

博士研究生学位论文

题目: 关于脉冲星的两项研究

姓	名	:	于萌
学	号	:	10804863
院	系	:	物理学院天文学系
专	业	:	天体物理
研究フ	方向	:	高能与相对论天体物理
导师女	性名	:	徐仁新 教授
			乔国俊教授
			岳友岭 副研究员

二〇一二年六月

版权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人,未经本论文作者同意,不 得将本论文转借他人,亦不得随意复制、抄录、拍照或以任何方式传播。否 则,引起有碍作者著作权之问题,将可能承担法律责任。

摘要

本篇论文涵盖了作者博士期间关于脉冲星所作的两项工作。第一项工作是 研习脉冲星类天体的热X射线谱,并为其建立固态夸克星的理论模型。在工作 中,我们计算了固态夸克星的热容,包括固体晶格的贡献和极端相对论电子气 的贡献。结果显示固态夸克星内部残留的热往往不够支持典型的脉冲星表现出 的热X射线光度。于是,一些再加热的机制应该在起作用。我们探索了两种可 能的机制。对于磁层不活跃的脉冲星类天体,来自对于星际介质或者是对于超 新星遗迹回落的物质的吸积可能是这类脉冲星热辐射的能量的来源。在螺旋桨 相下,当盘吸积率大约为Eddington吸积率的1%时,如果最终有~0.1%的物质 能够被吸积到星体的表面,那么这些物质所释放的能量就可以解释在暗热中子 星和中央致密天体中所观测到的X射线热光度。对于存在显著磁层活动性的脉 冲星,在星体两极处的回流粒子可能是这些脉冲星的热辐射的能量来源。我 们通过比较脉冲星的X射线热光度和自转能量损失率,发现这两者之间存在一 个"1/2率"或一个"线性率",即 $L_{\rm hol}^{\infty} \propto \dot{E}^{1/2}$ 或 $L_{\rm hol}^{\infty} \propto \dot{E}$ 。我们根据固态夸克 星的热属性与观测得到的这些关系描绘出了固态夸克星的热演化曲线。通过 与17颗冷却中子星的观测数据的比较,我们发现固态夸克星的热演化模型与观 测相符合。

第二项工作是对于脉冲星自转周期跳变现象(简称"跳变")的观测研究。在工作中,我们对165颗射电脉冲星的计时数据进行处理,寻找周期跳变现象。这些数据由澳大利亚Parkes天文台的64米口径射电望远镜观测得到, 覆盖的时段为1990年至2011年。通过处理总长度达1911年的数据,我们在36颗 南天脉冲星中探测到了107次跳变现象。在这些测到的跳变中,有61次事件已 经被报道过,而另外46次为新的发现。通过拟合计时残差,我们为所有探测 到的跳变测量了跳变参数。观测到的跳变相对幅度Δνg/ν分布在10⁻¹⁰和10⁻⁵之 间,其中ν = 1/P为脉冲频率。我们确定了跳变相对幅度的分布中所呈现的 双峰结构,一个峰在大约10⁻⁹,一个在大约10⁻⁶。多数的跳变事件发生在特 征年龄在10³至10⁵年的脉冲星中,并且大幅度的跳变倾向于发生在年轻脉冲星 中。在18颗脉冲星的27次跳变之后,我们测到了指数恢复过程。指数恢复比 例Q的典型值大约在百分之一的量级,不过我们在3颗脉冲星当中测到了比较大 的Q值。我们观测到的指数恢复的时间常数分布在10至300天之间,并且似乎存 在这样一种趋势:年老脉冲星的时间常数偏长。更短时标的指数衰减过程可能

– I –

存在。但是,我们并没有测到。对于某一颗脉冲星,我们的两次观测的典型间 隔为2至4周。因为这个相对较低的观测采样,使得我们很难测到短时标的指数 衰减。在多数的后跳变的计时行为中,我们观测到了脉冲频率一阶导数*i*的线性 增加(或者说是脉冲频率减慢率|*i*|的线性减少)。在一些跳变发生之后,这种 线性恢复过程的比率会发生变化。线性恢复过程由脉冲频率二阶导数*i*表征。 观测发现对于存在跳变现象的脉冲星,*i*往往为正,并且大*i*多发生于|*i*|比较大 的脉冲星当中。跳变导致的比较大的*i*的变化,也多发生于|*i*|比较大的脉冲星 中。

关键词:论文,北京大学,博士,天文学,脉冲星

Two Researches on Pulsars

by Meng Yu (Astronomy and Astrophysics) Directed by Prof. Renxin Xu, Prof. Guojun Qiao, Associated Research Prof. Youling Yue

The present thesis comprises the two research projects on pulsars that were carried out by the author for the degree of doctor of philosophy. In the first project, we present a theoretical model for the thermal X-ray emission properties and cooling behaviors of isolated pulsars, assuming that pulsars are solid quark stars. We calculate the heat capacity for such a quark star, including the component of the crystalline lattice and that of the extremely relativistic electron gas. The results show that the residual thermal energy cannot sustain the observed thermal X-ray luminosities seen in typical isolated X-ray pulsars. We conclude that other heating mechanisms must be in operation if the pulsars are in fact solid quark stars. Two possible heating mechanisms are explored. Firstly, for pulsars with little magnetospheric activities, accretion from the interstellar medium or from the material in the associated supernova remnants may power the observed thermal emission. In the propeller regime, a disk-accretion rate $\dot{M} \sim 1 \%$ of the Eddington rate with an accretion onto the stellar surface at a rate of $\sim 0.1\% \dot{M}$ could explain the observed emission luminosities of the dim isolated neutron stars and the central compact objects. Secondly, for pulsars with significant magnetospheric activities, the pulsar spindown luminosities may have been as the sources of the thermal energy via reversing plasma current flows. A phenomenological study between pulsar bolometric X-ray luminosities and the spin energy loss rates presents the probable existence of a 1/2-law or a linear law, i.e. $L_{\rm bol}^{\infty} \propto \dot{E}^{1/2}$ or $L_{\rm bol}^{\infty} \propto \dot{E}$. This result together with the thermal properties of solid quark stars allow us to calculate the thermal evolution of such stars. Thermal evolution curves, or cooling curves, are calculated and compared with the 'temperature-age' data obtained from 17 active X-ray pulsars. It is shown that the bolometric X-ray observations of these sources are consistent with the solid quark star pulsar model.

In the second project, timing observations from the Parkes 64-m radio telescope for 165 pulsars from 1990 to 2011 have been searched for period glitches. From a total of 1911 years of pulsar rotational history 107 glitches were identified in 36 pulsars. Out of these glitches, 61 have previously been reported whereas 46 are new discoveries. Glitch parameters, both for the previously known and the new glitch detections, were

measured by fitting the timing residual data. Observed relative glitch sizes $\Delta \nu_{\rm g}/\nu$ range between 10^{-10} and 10^{-5} , where $\nu = 1/P$ is the pulse frequency. We confirm that the distribution of $\Delta \nu_{\rm g} / \nu$ is bimodal with peaks at approximately 10^{-9} and 10^{-6} . Glitches are mostly observed in pulsars with characteristic ages between 10^3 and 10^5 years, with large glitches mostly occurring in the younger pulsars. Exponential postglitch recoveries were observed for 27 large glitches in 18 pulsars. The fraction Qof the glitch that recovered exponentially was typically just a few per cent, although larger Q values were seen in three pulsars. Observed time constants for exponential recoveries ranged between 10 and 300 days with some tendency for longer timescales in older pulsars. Shorter timescale recoveries may exist but were not revealed by our data which typically have observation intervals of 2 - 4 weeks. For most of the 36 pulsars with observed glitches, there is a persistent linear increase in $\dot{\nu}$ (i.e., decrease in the slow-down rate $|\dot{\nu}|$) in the inter-glitch interval. Where an exponential recovery is also observed, the effects of this are superimposed on the linear increase in $\dot{\nu}$. In some but not all cases, the slope of the linear recovery changes at the time of a glitch. The $\ddot{\nu}$ values characterising the linear changes in $\dot{\nu}$ are almost always positive and are larger for high- $|\dot{\nu}|$ pulsars. Changes in $\ddot{\nu}$ at the time of a glitch are also larger in high- $|\dot{\nu}|$ pulsars.

Key Words: thesis, Peking University, Ph.D., astronomy, pulsars

日	쿴
н	

摘 要	Ι
ABSTRACT(英文摘要)	III
第一章 绪 论	1
1.1 脉冲星与中子星	1
1.2 脉冲星的发现	1
1.3 中子星的证认	3
1.4 X射线脉冲星的发现	6
1.5 中子星物理	7
第二章 脉冲星表面X射线热辐射及冷却过程的夸克星模型	9
2.1 引言	9
2.1.1 课题背景	9
2.1.2 X射线脉冲星的分类	10
2.2 样本	11
2.3 X射线热光度与Ė的比较	13
2.4 夸克星的形成与热演化阶段	16
2.4.1 夸克星的形成	16
2.4.2 一个可能的夸克星热演化的图像	19
2.5 固态夸克星的热容	21
2.6 固态夸克星的再加热	22
2.6.1 自转起源的星体再加热	23
2.6.2 吸积起源的星体再加热	24
2.7 观测数据与理论预期的比较	25
2.7.1 磁层活跃脉冲星的冷却	25
2.7.2 惰性磁层脉冲星的X射线热光度	26
2.8 结论与讨论	29
2.8.1 自转能驱动的脉冲星	30
2.8.2 吸积能驱动的脉冲星	30

– V –

第三章 一项对于射电脉冲星自转频率跳变的观测研究
3.1 引言
3.2 观测
3.3 数据分析 36
3.4 结果 43
3.4.1 129颗脉冲星的计时残差 43
3.4.2 36颗南天脉冲星中测到的107个跳变 53
3.5 讨论
3.5.1 跳变的分布 71
3.5.2 跳变恢复过程101
结论111
参考文献115
致谢129

表格

2.1	X射线脉冲星的热辐射观测数据。表格中依次列出脉冲星编号,	
	脉冲星名称,年龄,星体表面温度组分1($T^{\infty}_{ m s,1}$),星体热辐射区	
	域尺度组分1(R_1^∞),星体表面温度组分2($T_{ m s,2}^\infty$),星体热辐射	
	区域尺度组分2(R_2^{∞}),X射线热辐射光度 L_{bol}^{∞} 和参考文献。	14
2.1	续表	15
2.2	对以 $L^{\infty}_{X, bol}$ 作为 \dot{E} 函数的数据的拟合结果。	18
2.3	由固态夸克星的冷却模型估算的17颗脉冲星的转动惯量。第5列	
	所列出的是由 ₂ 率估计出的结果,而第6列给出由线性率估计出	
	的结果。除RX J0822-4300外,其它星体的自转参数取自ATNF	
	Pulsar Catalogue。RX J0822-4300的自转参数取自Zavlin, Trümper	
	& Pavlov(1999) [1].	26
2.4	固态夸克星在螺旋桨相吸积下的热X射线光度。表中第二列所给	
	出的是相应固态夸克星的Eddington吸积率。计算热光度时,相变	
	潜热取为 $\Delta \epsilon = 100 \mathrm{MeV}$ 。	29
3.1	本工作样本中的脉冲星。这些星已由Parkes天文台观测5年以上。.	37
3.1	续表	38
3.1	续表	39
3.2	36颗跳变脉冲星的位置与自行参数。	53
3.3	36颗跳变脉冲星的前/后跳变计时参数。	54
3.3	续表	55
3.3	续表	56
3.4	跳变参数。	68
3.4	续表	69
3.4	续表	70
3.5	所有已知跳变脉冲星的平均到一年内的跳变事件数目。	96
3.5	续表	97
3.5	续表	98

插图

- 2.1 周期-周期变化率 $(P \dot{P})$ 图。本文样本中的X射线脉冲 星以蓝点标注于图中。六角星标注了与超新星遗迹成协的 源,五角星标注了不与超新星遗迹成协的源。三角形标注 了4颗XDIN,四边形标注了2颗CCO。图中的直线画出了一颗 典型脉冲星 (质量1.4 M_{\odot} ,半径10km)与小质量夸克星 (质 量~10⁻²-~10⁻¹ M_{\odot})的"死亡线"。死亡线的定出假设了 星体表面偶极磁场强度为 $B = 10^{12}$ G和开放磁力线区的电势差 为 $\delta \phi = 10^{12}$ V。磁场的减弱与/或电势差的增加会导致死亡线上 移 [2]。周期与周期变化率的数据取自ATNF Pulsar Catalogue, RX J0822-4300的数据取自Zavlin, Trümper & Pavlov(1999) [1]。... 12
- 2.3 一颗夸克星的可能的冷却阶段。阶段1:单夸克相。夸克星初始 诞生时可能具有很高的温度(≥10 MeV),星体内部可能是由单 个的夸克组成的流体。阶段2:单夸克簇相。随着温度的降低, 夸克之间的强耦合可能会使单独的夸克聚集,形成夸克簇。这是 星体内部可能是由夸克簇构成的流体。阶段3:固态夸克星相。 随着温度降低至溶点,流体夸克簇可能会倾向于固化,形成具有 周期性点阵结构的晶格,比如:体心立方密堆结构(bcc)。... 19

– VIII –

- 臺率情况下的冷却曲线(左图)与温差演化曲线(右图)。实 2.5 线对应固态夸克星质量 $M = 0.1 M_{\odot}$ 和常数 $C = 10^{16}$; 虚线对 应 $M = 1.0M_{\odot}$ 和 $C = 10^{16}$; 点线对应 $M = 1.0M_{\odot}$ 和 $C = 10^{15}$; 点虚线对应 $M = 0.01 M_{\odot} \ \pi C = 10^{15} \ (C$ 的单位为erg^{1/2}s^{-1/2})。 对于具有相同M和C的两条曲线,上边一条对应的初始自转周 期为10ms,而下边一条对应的初始自转周期为100ms。对于编 号3的PSR J0205+6449和编号17的PSR J2043+2740,表2.1所列文 献中没有给出温度的误差。在这里,我们取为上下偏离中心 值2倍。..... 2.6 线性率情况下的冷却曲线(左图)与温差演化曲线(右 图)。实线对应 $M = 1.0M_{\odot}$ 和 $\eta = 0.01$; 虚线对应M = $1.0M_{\odot}$ 和 $\eta = 0.001$; 点虚线对应 $M = 0.1M_{\odot}$ 和 $\eta = 0.1$; 点线对 上边一条对应初始自转周期为10ms,下边一条对应初始自 转周期为100ms。对于编号3的PSR J0205+6449和编号17的PSR J2043+2740,表2.1所列文献中没有给出温度的误差。在这里, 28 周期-周期一阶导数图。样本中的脉冲星由一个小叉子标记,样 3.1 本中观测到有跳变的脉冲星用一个三角形标志表示。其它脉冲星 由小圆点标记。数据来自ATNF Pulsar Catalogue。 35 证认跳变事件的图示。上图: Vela脉冲星中发生于MJD 3.2 ~53193.09的大幅度跳变。计时解的相位连贯性被此跳变破坏。 下图: PSR J1048-5832中发生于MJD~53674.3的小幅度跳变。计

– IX –

3.4	129颗脉冲星的后拟合计时残差。拟合参数为脉冲频率与脉冲频 率一阶导数。脉冲星名称后括号内的字符"A"表示由模拟滤波 器组纪录的数据,字符"D"表示由数字滤波器组纪录的数据。 脉冲星名称下边的数字表示该星计时残差的峰-峰值,单位为脉 冲星脉冲周期。	44
3.4	续图	45
3.4	续图	46
3.4	续图	47
3.4	续图	48
3.4	续图	49
3.4	续图	50
3.4	续图	51
3.4	续图	52
3.5	PSRs J0729-1448和J0742-2822中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来; 中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到; 下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。	72
3.5	PSRs J0834-4159和J0835-4510中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来; 中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到; 下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。	73
3.5	PSRs J0905-5127和J1016-5857中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来; 中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到; 下子图显示	

脉冲频率一阶导数i,。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,

虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。 .. 74

– X –

- 3.5 PSRs J1048-5832和J1052-5954中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...75
- 3.5 PSRs J1105-6107和J1112-6103中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...76
- 3.5 PSRs J1119-6127和J1301-6305中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...77
- 3.5 PSRs J1341-6220和J1412-6145中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...78
- 3.5 PSRs J1413-6141和J1420-6048中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...79

– XI –

- 3.5 PSRs J1452-6036和J1453-6413中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...80
- 3.5 PSRs J1531-5610和J1614-5048中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...81
- 3.5 PSRs J1646-4346和J1702-4310中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...82
- 3.5 PSRs J1709-4429和J1718-3825中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...83
- 3.5 PSRs J1730-3350和J1731-4744中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...84

– XII –

- 3.5 PSRs J1737-3137和J1740-3015中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。 ... 85
- 3.5 PSRs J1801-2304和J1801-2451中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...86
- 3.5 PSRs J1803-2137和J1809-1917中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来; 中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到; 下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...87
- 3.5 PSRs J1825-0935和J1826-1334中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...88
- 3.5 PSRs J1835-1106和J1841-0524中的跳变。上子图显示脉冲频率 残差, Δν, 由扣除通过第一个前跳变解中的ν和ν所推算得到的 脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差Δν的表示进行了 放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示 脉冲频率一阶导数ν。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间, 虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。...89
- 3.6 上图:跳变相对尺度的直方图。下图:跳变绝对尺度的直方图。 . 91

– XIII –

3.7	表征与跳变相关物理量的 <i>P</i> – <i>P</i> 图。其中, a) 跳变数目, b) 平均每年的跳变数目。标记圆圈表示相应的值来自ATNF Pulsar Catalogue glitch table, 三角形表示相应的值来自本工作。在各个子图中,一些脉冲星被额外标记: 1 – PSR J0534+2200, 2 – PSR J0537-6910, 3 – PSR J0835-4510, 4 – PSR J1341-6220, 5 – PSR J1740-3015, 6 – PSR J0631+1036, 7 – PSR J1801-2304和两颗超		
3.7	磁星: A – PSR J1048–5937, B – PSR J1841–0456。 表征与跳变相关物理量的 <i>P</i> – <i>P</i> 图。其中, c) 最大的相对幅 度, d) 最大的绝对幅度。标记圆圈表示相应的值来自ATNF Pulsar Catalogue glitch table, 三角形表示相应的值来自本工作。在各个 子图中, 一些脉冲星被额外标记: 1 – PSR J0534+2200, 2 – PSR J0537–6910, 3 – PSR J0835–4510, 4 – PSR J1341–6220, 5 – PSR J1740–3015, 6 – PSR J0631+1036, 7 – PSR J1801–2304和两颗超	•	92
3.7	 磁星: A – PSR J1048–5937, B – PSR J1841–0456。 表征与跳变相关物理量的P – P图。其中,e)方均根相对幅度,f)由相对幅度均值归一化的方均根幅度。标记圆圈表示相应的值来自ATNF Pulsar Catalogue glitch table,三角形表示相应的值来自本工作。在各个子图中,一些脉冲星被额外标记:1 PSR J0534+2200, 2 – PSR J0537–6910, 3 – PSR J0835–4510, 4 PSR J1341–6220, 5 – PSR J1740–3015, 6 – PSR J0631+1036, 7 PSR J1801–2304和两颗超磁星: A – PSR J1048–5937, B – PSR J1841–0456。 		93 94
3.8	七颗脉冲星的跳变事件时间序列。标记圆圈表示来自ATNF Pulsar Catalogue glitch table 的数据,而三角形表示来自本文的数据。脉冲星的特征年龄被标注在括号中。	•	95
3.9	表现指数恢复过程恢复比例 Q (上图)和时间常数 τ_{d} (下图)的 $P - \dot{P}$ 图。圆圈符号的尺度与参数大小成线性关系。	. 1	103
3.10	指数恢复比例 Q 与跳变相对尺度 $\Delta \nu_{\rm g} / \nu$ (子图a)和时间常数 $\tau_{\rm d}$ (子图b)的比较。	. 1	104
3.10	指数恢复时间常数 τ_d 与跳变相对尺度 $\Delta \nu_g / \nu$ (子图c)和脉冲星特征年龄 τ_c (子图d)的比较。	. 1	105
3.11	线性衰减率 $\ddot{\nu}$ 与自转减慢率 $ \dot{\nu} $ 的比较。圆圈和三角形的符号分别表示正和负值。实线相应于制动指数 $n = 3\pi\nu = 10$ Hz。	. 1	106

– XIV –

3.12	线性iv恢复过程的比率的变化与自转减慢率 i/(子图a)和跳变相
	对幅度 $\Delta \nu_{\rm g} / \nu$ (子图b)的比较。
3.13	跳变脉冲星内部制动导致的üint与自转减慢率 i 和跳变平均间隔
	时间< 7g >之间比值的比较。图中的直线为通过最小二乘法对数
	据进行的拟合。

第一章 绪 论

1.1 脉冲星与中子星

在1934年,W. Baade和F. Zwicky具有预测性的指出在恒星演化的终点可能存在一种星体,这种星体主要由中子组成,可以称为中子星。这个大胆的预言在当时看起来非常难以通过观测来证实。因为,中子星非常小,温度可能非常低,并且可能只存在微弱的辐射。三十多年以后的对于脉冲星的首次探测成功以及随后几个月对于脉冲星即为中子星的论证,使Baade和Zwicky的预言最终走向成功[4]。

中子星的内部的物理条件堪称极端:密度高达10¹⁴gcm⁻³,磁场可以达到10¹²G,而星体半径只有大约10km。与Baade和Zwicky对于中子星的预言类似,对这样的极端物理条件的存在的预言同样发生在脉冲星发现之前。在1939年,Oppenheimer和Volkoff运用一个简单的状态方程估计出了典型中子星应该具有的质量,密度和半径。在1964年,Hoyle,Narlikar和Wheeler论证说一个强度为~10¹⁰G的磁场可能存在于Crab星云中心的中子星当中。在1967年,就在发现脉冲星之前,Pacini提出一颗强磁化中子星的快速旋转可能是Crab星云的能量来源。

但是,当时的射电天文学家却完全没有预料到这种"奇异"的中子星会存 在射电辐射,并且还会像灯塔一样辐射出有规律的脉冲序列。发现脉冲星的射 电天文学家是在并不知晓理论上的最新进展的情况下观测到脉冲星的。像脉 冲星这样的致密天体曾经被认为可能是重要的X射线源。在1964年,Zel'dovich & Guseynov (1964)和Hayakawa & Matsouka (1964)分别提出双星系统可能为可观 的X射线源。如果在一个双星系统当中,一个为一颗致密星,一个为一颗大质 量的主序星并且正在通过星风损失质量,那么有可能恒星的物质会被吸积到致 密星的表面且形成一块高温的热斑。这块热斑将会辐射热X射线光子。

1.2 脉冲星的发现

在第二次世界大战结束的随后三十年里,射电天文学有了巨大的飞跃性的 发展,这种发展的标志就是一系列新的观测技术的实现,而每一项观测技术的 引进都使得射电天文学的某一个分支取得了长足的发展。实际上,当时的每一

-1-

项先进技术的引进都是为了解决某一个具体问题,因为天空中的射电天文现象 非常丰富,所以先进技术的引进有时会引起出人意料的发现。J.S. Hey和他的同 事们曾经为深入进行他们的关于雷达的工作需要详细了解天空射电背景辐射, 结果却导致了第一个射电源Cygnus A的发现。另外一项新技术的研发,旨在研 究射电星系,测量它们的位置和尺度,却导致了类星体的发现。脉冲星的发现 过程也与此类似 [4]。

实际上,在发现脉冲星十年之前,人们就已经有可能探测到脉冲星。脉冲 星信号早已经被多次的射电巡天项目所记录下来。但遗憾的是当时并没有引起 人们的注意。首要的原因是,射电天文学家在当时并不认为任何天体会辐射快 速扰动的射电信号,脉冲式的信号被认为是地面上产生的射电干扰,比如说 某一辆汽车的启动打火。正是缘于这样的判断使得人们在设计接收机时就将 任何的脉动式的信号自动的平滑掉,而只接受稳定的信号。从另外一个方面 讲,射电干扰的脉动也往往比较有规则。因此,在当时即使人们看到了脉冲 星的信号,也很容易就会产生误解。举例来说,现在为人们知晓的脉冲星PSR B0329+54的信号就曾经多次出现在巡天项目的结果当中,但是没有被证认出 来。

夜空当中的恒星往往表现出"眨眼睛"的现象。这种闪烁是由地球大气的 折射率的随机扰动引起的。射电天文同样存在"闪烁"现象。遥远的射电天体 发出的信号会经过星际的电离气体,太阳系中行星际的电离气体和地球的电离 层之后到达观测者。这三个路径当中的每一个成分都会对射电信号产生随机的 折射,使得我们看到射电闪烁。在二十世纪中叶,这种射电闪烁在英国剑桥有 着深入的研究,代表人物即为A. Hewish。脉冲星的发现并不是这方面研究所 期待的直接结果。但是,最终人们意识到脉冲星是研究星际闪烁的最有力的样 本。

Jocelyn Bell当时是Hewish的研究生。他们两人共同搭建了一个米波天线及 接受系统,并使整个系统对弱射电源非常敏感。在米波这样的长波波段,行星 际的闪烁效应非常的显著。Hewish和Bell使用这个系统进行了一次巡天,并将 接收机的积分时间调整得比较短,使其能够敏感于快速的射电闪烁。Hewish计 划使用这个巡天项目的结果来研究类星体的分布和属性。在观测开始之后的大 约一个月时间的1967年7月,Bell在观测记录中发现了明显的信号扰动,并且这 个扰动在接连的观测中连续的出现。这并不太像是星际闪烁,而非常可能是射 电干扰。于是,在Hewish看过之后,首先怀疑这是地面干扰。但是,在随后的

-2-

观测中,这个信号持续的出现,并且每天早出现4分钟。这与天文现象非常的吻合。于是,在10月,Hewish意识到可能存在了新的发现。然后,他和他的同事 们使用了响应时间更短的接收机来观测。在进行了一个月左右的观测之后,他 们惊讶的看到了一个脉冲序列,周期大约为1.337s。在1968年2月,他们的这项 发现被发表在Nature杂志上[5]。

1.3 中子星的证认

尽管有Baade和Zwicky的早期的猜想以及Pacini在1967年关于Crab星云的大 胆猜测 [6], 但是中子星的概念还只是被少部分天体物理学家所了解, 多数 天文学者包括Hewish对中子星并不熟悉。于是,在Hewish发现了"脉冲星" 后,多数人认为这种脉动可能是源自于白矮星的振荡。在1968年的6月,T. Gold在Nature上撰文,详细阐述了脉冲星很可能是快速旋转的中子星的思 想。Pacini和Gold应该被认为是将脉冲星与中子星联系起来的奠基人。尽管如 此,关于脉冲星到底是白矮星还是中子星的争论依然存在,并且当时主流的 观点仍然认为脉冲星是白矮星的表现。这个争论随着短周期的Crab和Vela脉 冲星的发现而告终。白矮星的理论只能够解释周期大约为1s的脉冲星,最 大程度下也只能解释周期大约为0.25 s的脉冲星。在澳大利亚, Large et al. (1968)发现了Vela脉冲星,周期只有89 ms [7]。在美国, Staelin & Reifenstein (1968)发现了Crab脉冲星,周期更短而只有33 ms [8]。只有中子星的旋转可以 如此之短。而且, Pacini和Gold已经指出中子星的自转会存在自转减慢现象。 很快Richards & Comella (1969)确实在Crab脉冲星中观测到了脉冲周期增加的现 象 [9]。另外,无论是Crab脉冲星还是Vela脉冲星,它们都与超新星遗迹成协, 这与Baade和Zwicky的预言相一致。

尽管脉冲星被证认为中子星的原因已经在概念上进行了叙述,不过可以 再详细的考察一下振荡模型与转动模型。Melzer & Thorne (1966)指出白矮星的 径向振动在基态模式下具有周期~ 10 s [10]。这个周期由引力与弹性力共同决 定,不过我们可以通过简单的计算估计一下。径向振动的周期并不依赖于半 径,而正比于 $\frac{1}{\sqrt{G\rho}}$,其中G为引力常数,而 ρ 为密度。对于典型的白矮星,密 度 $\rho \sim 10^7$ g cm⁻³,振动的周期为大约10 s,如果只有引力作为恢复力的话。在 考虑弹性力的情况下,振动的周期会减少到1 s 的量级。在白矮星的基态振动 模式下,不很可能存在比这个周期还短的振动,而高模振动又不可能产生观 测到的简单的脉冲轮廓。Melzer和Thorne同样计算了中子星的振荡周期,大约

- 3 -

为1—10ms。不过,对于中子星来说,又不是很可能存在周期为1s的振荡。

再谈中子星的转动。对于一个转动的星体,最大的转动角速度Ω由一个试 验质点在赤道处受到的离心力与引力的平衡来决定:

$$\Omega^2 r = \frac{GM}{r^2} \tag{1.1}$$

如果这颗星具有均匀密度 ρ ,那么它可能的最短的旋转周期 P_{\min} 为

$$P_{\min} = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}} \tag{1.2}$$

对于1s的周期来说,相应的密度要达到10⁸g cm⁻³,这个值尚在白矮星的密度范围之内。但是,一颗中子星却可以转到1.5 ms,正如随后发现的毫秒脉冲星PSRB1937+21。Gold (1968)指出一颗旋转的中子星可能存在非常强的磁场,这样的磁场会驱动一个共转磁层的存在,脉冲星的自转能量会通过磁偶极辐射损失掉,导致脉冲星的自转减慢[11]。Pacini (1968)考虑了自由空间中的一个磁偶极子作为中子星的模型,偶极子通过辐射将转动能损失。转动能W的损失率可表示为[12]

$$\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = \frac{2\Omega^4}{3c^3} M_{\perp}^2 = \frac{\Omega^4}{3c^3} r^6 B_0^2 \mathrm{sin}^2 \alpha$$
(1.3)

从而,转动角频率的变化率Ω为

$$\dot{\Omega} = \frac{\Omega^3}{3Ic^3} r^6 B_0^2 \sin^2 \alpha \tag{1.4}$$

其中 $M_{\perp} \sim B_0 r^3 \sin \alpha$ 为磁偶极子磁矩相对于旋转轴的垂直分量, B_0 是偶极子的 磁感应强度, α 磁倾角为偶极子与自转轴之间的夹角。

正如前文所提及的,对Crab脉冲星的首次的自转减慢的测量由Richards & Comella (1969)给出 [9]。他们测得从1968年10月到1969年2月,Crab的周期平均每天延长大约36.48±0.04 ns。这个自转减慢率与Crab星云的年龄相吻合,从而确定了脉冲星源于超新星爆发的预测。而且,从这个自转减慢率推测出的脉冲星的自转能量损失率正好于Crab星云的同步辐射的光度相一致,从而确定了Crab星云的中心存在中子星并由中子星供能的猜想 [13]。这两点最终进一部了完成了脉冲星为旋转中子星的证认。

-4-

对于Vela脉冲星,人们同样检测到它的自转周期也在缓慢的增加,只是 增加率相比于Crab要小很多,大约为每天11 ns。在1969年初,Radhakrishnan & Manchester (1969)和Reichley & Downs (1969)分别独立的观测到Vela脉冲星的自 转周期突然减少了约200 ns。这个自转加速被确认是在一周内完成的。人们相信 这不是正常的脉冲星自转的行为,而后来被人们称为脉冲星自转周期"跳变" (glitch) [14,15]。后来脉冲星的自转周期的跳变被相信是脉冲星的转动惯量的 突然的变化引起的,转动惯量的改变可能是星体突然收缩或者是星体发生星震 使得脉冲星的扁率突然减小了。

实际上当时对于脉冲星是什么的猜测并不只有白矮星的振荡和中子星的转动这两种。还曾经有过建议提出脉冲星可能反映了双星系统中的行星和卫星的轨道周期。虽然这种猜测最终被否定了,但是这为后来研究双星系统中的脉冲星,特别是对于后来发现的双中子星系统PSR B1913+16的相对论动力学提供了先驱性的研究。假定一颗行星围绕一颗致密的中央天体作圆轨道的公转,半径为R。脉冲星表现出的周期P为行星的轨道周期。如果中央致密星的质量为M,那么在R和P之间满足关系

$$R \approx 1.5 \times 10^3 (\frac{M}{M_{\odot}})^{1/3} P^{2/3} \mathrm{km}$$
 (1.5)

如果说是一颗行星以周期1s围绕一颗白矮星公转,那么轨道半径为1500km。这 个半径几乎与白矮星半径相当。看起来,似乎把中央致密星假定为中子星比较 合理,这样周期可以小到约1ms。不过这个模型存在两个问题。第一个问题关 于引力辐射。当一个双星系统中的两颗星互相绕转时,质量的四极矩会产生变 化,这种变化会辐射出引力波。引力波的辐射会使双星系统的轨道周期逐渐增 加。周期减小的时标τ由Ostriker (1968)估计出为 [16]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\Omega} \frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t} = \frac{96}{5} \frac{\epsilon}{(1+\epsilon)^{1/3}} \frac{(GM)^{5/3}}{c^5} \Omega^{8/3},\tag{1.6}$$

其中 $\epsilon = \frac{m}{M}$ 为行星质量与中央致密星质量之比, $\Omega = \frac{2\pi}{P}$ 为系统轨道角频率。对于P = 1 s, ϵ 很小的情况,当 $M = M_{\odot}$ 时,时标 τ 为

$$\tau = 2.7 \times 10^5 \epsilon^{-1} \mathrm{s} \tag{1.7}$$

- 5 -

很明显这个时标非常短。Pacini & Salpeter (1968)很快估计出,如果将当时测得的脉冲星的自转减慢引入这个模型,那么行星的质量会为 $m \leq 3 \times 10^{-8} M_{\odot}$ [17]。即使这样小质量的行星可以存在,那么Pacini & Salpeter (1968)进一步指出这颗行星也非常有可能被很强的潮汐力撕裂 [17]。

1.4 X射线脉冲星的发现

X射线天文学的发展伴随着宇航时代的到来。由于X射线会被地球大气层吸收,所以探测X射线唯一的途径是将探测器送入太空当中,或者是使用气球将探测器带到高空。X射线天文的发展起步于第二次世界大战之后的1949年。当时,人们将盖革计数器搭载在V-2火箭上送入空间。当时的主要目的是用来探测太阳发出的X射线。实际上太阳的X射线流量非常低,不过当时的人们认为宇宙中的X射线源都应该是像太阳一样的恒星,太阳离我们最近,所以并不期待从其它恒星能够观测到可观的X射线。随后升空的Aerobee火箭创造了历史,第一个太阳之外的明亮的X射线源被探测到,这就是Scorpius X-1(简称Sco X-1)。 尽管我们现在知道Sco X-1是一个X射线脉冲星双星系统,但在当时还是存在很大争议的[18]。

X射线天文学有长足发展是在1970年美国国家航空航天局(NASA)发射了探测器Uhuru之后。这个探测器覆盖的能段达到2—20keV,发射这个探测器的目的是为了更好的确定X射线源的位置,研究X射线源的能谱和时变特性。在Uhuru服役的27个月里,一共有大约300个X射线源被探测到。在1971年1月,Giacconi et al. (1971)发现曾经的X射线源Centaurus X-3(简称Cen X-3)表现出明显的周期性的脉冲。通过测量他们发现脉冲周期为4.84 s,这是首颗被发现的X射线脉冲星[19]。第二个X射线脉冲星Hercules X-1(Her X-1)于1971年底被发现,这颗脉冲星的周期为1.24 s,现在这个源已经是被研究得最为广泛的吸积功能的脉冲星之一[20]。对于Crab脉冲星,Boldt et al. (1969)和Fishman et al. (1969)共同证认其也是一颗X射线脉冲星[21,22]。随后的Gamma射线探测甚至发现Crab脉冲星也是一个很亮的Gamma源。于是,Crab脉冲星的能谱被发现跨越了18个量级,从射电的30 MHz到Gamma射线的10 GeV [4]。

在Uhuru之 后 随 着 多 台X射 线 望 远 镜 的 发 射 升 空 , 比 如RXTE, BeppoSAX, Chandra和XMM-Newton, 上 百 颗X射 线 脉 冲 星 相 继 被发现,自转周期跨越了从1.7 ms到大约10 s,使得我们了解到很多X射线脉-6-

冲星的子类别,比如:X射线脉冲星双星,暗热中子星(X-ray Dim Isolated Neutron Stars, XDINs),中央致密天体(Central Compact Objects, CCOs)和超磁星(magnetars)[18]。这些脉冲星类天体展现的丰富的观测现象,为人们深入理解脉冲星提供了难得的机遇。

1.5 中子星物理

现在,人们已经普遍接受脉冲星是快速旋转的,强磁化,高致密的中子 星。人们原本认为中子星的内部结构可能是简单的中子流体。但是随着脉冲星 自转周期跳变(glitch)的发现,中子星的内部结构被意识到显现出很多复杂的 方面。脉冲星自转跳变的发行促使人们了解到中子星内部可能存在一个旋转的 超流体的成分,其角速度要大于观测到的固体壳层的角速度。超流体的角动量 是量子化的,其角动量单元由"涡丝"来描述。超流体的总角动量正比于涡丝 的面密度,随着星体自转减慢,涡丝的面密度降低,换句话说是涡丝在逐渐向 外移动。跳变的发生反映了超流体向壳层传递角动量的不连续性,当超流体的 角动量积累到一定的程度的时候,其角动量会在短时间快速释放到壳层。在中 子星周围的空间当中,由中子星的快速旋转和极强的磁场会激发起一个充满着 电荷的"磁层"。磁层与脉冲星共转,其尺度可以延伸到转动的线速度与光速 相当的地方。对于磁层的分析, Goldreich & Julian (1969)进行了先驱性质的研 究 [23]。对于中子星的质量的测量对于研究中子星内部结构的状态方程很有帮 助,多数的测量显示中子星的质量分布在 $1.2 - 1.5M_{\odot}$ [4]。但是,最近Demorest et al. (2010)测量到PSR J1614-2230的质量为1.97±0.04M₀,这个两倍太阳质量 中子星的出现排除掉了原先提出的一些偏"软"的状态方程, 使得人们对于中 子星的内部结构又有了进一步的理解 [24]。

第二章 脉冲星表面X射线热辐射及冷却过程的夸克星模型

2.1 引言

2.1.1 课题背景

脉冲星的表面X射线热辐射及其冷却过程与脉冲星本身休戚相关,对于这 个问题的探讨有助于理解脉冲星的内部组成、状态和星体结构,进而对于认识 超核物质密度物质的组成和状态有所帮助。中子星是脉冲星的传统理论模型。 人们在中子星框架下,已经对于脉冲星的热X射线表面辐射和冷却有着广泛而 深入的研究 [25,26]。中子星研究者们认为,脉冲星冷却过程的能量来源主要 是中子星本身的内能,或者说是在超新星爆发后星体内部所残留的热。在我们 的这项工作中,我们尝试从夸克星的视角来理解脉冲星的表面热X射线辐射及 冷却过程,并且通过与观测数据的比较,我们发现夸克星模型可能并不会被排 除。

对于"热"或者"冷"的夸克物质的物态的研究是近些年来一个非常令人 感兴趣的话题。在天体物理方面,由冷的夸克物质所组成的夸克星尚不能被脉 冲星类天体的观测表现所否定[27]。最近,已经有研究者提出致密星当中的现 实的夸克物质可能处于固态,这种固态也许是一种"超"固体(super-solid) 或者是普通固体[28,29,30,31,27]。对于以普通固体形式存在的夸克物质的一 个基本的猜测的图像是:解禁的夸克在温度和密度相对比较低时形成由若干夸 克(比如:重子数A~10或者~100)所组成的"夸克簇"(quark cluster), 当温度低于一定的临界温度时,众多夸克簇形成具有周期性点阵结构的晶 格,浸泡在极端相对论性电子构成的自由电子气当中。重离子碰撞试验(比 如:RHIC)已经发现,夸克之间的相互作用在温度甚高的夸克-胶子等离子体 中依然非常强,远强于人们事先的估计[32]。正是这个试验事实,才导致了关 于上述普通固态夸克物质的猜测的存在。早在二十世纪六十年代,人们就已经 认识到研究中子星的表面热辐射可以帮助了解中子星的内部结构。这个认识甚 至萌芽于脉冲星发现之前。在本项工作中,我们从夸克星的视角去研究这样一 个有着渊源历史的问题。

-9-

2.1.2 X射线脉冲星的分类

多架X射线空间望远镜(比如: ROSAT, Chandra和XMM-NEWTON)已经 揭示出脉冲星在X射线波段有着非常丰富的观测现象。观测结果显示,很多脉 冲星在X射线波段的辐射中同时具有热以及非热的辐射成分。对于热辐射成 分,人们相信很可能源自于星体的表面辐射。而非热的成分,往往伴随着脉冲 行为,也就是说,在X射线波段可以观测到辐射的脉冲。在发现这些普通X射线 脉冲星的同时,还有一些X射线脉冲星被发现,它们表现出非常独特的观测属 性。人们根据这些X射线脉冲星的不同的观测表现,将这些X射线脉冲星进行了 分类。

存在这样一类源,它们被证认为是孤立的中子星,并且不与超新星遗迹成 协。它们的X射线谱表现出非常类似于黑体的热谱。人们将这一类源称为暗热 中子星(X-ray Dim Isolated Neutron Star, XDIN)。XDIN在全波段并不表现出脉 冲行为。因此, 欲通过计时行为去估计它们的特征年龄是非常困难的。不过, 有一些源(比如: RXs J1856.5-3754和J0729.4-3125),它们的X射线光变曲线 显示出类似正弦曲线的起伏。有一种观点认为,这可能是星体表面存在热斑的 表现。这样的热斑可能出现在星体的极冠区。热斑的温度比星体大部的温度要 高,星体每自转一周,热斑就能够被"看"到一次,表现为光变曲线中的起 伏。这样,星体的自转周期等计时参数便可以从光变曲线作出一个估计,进而 估计出中子星的年龄。通过这种方法对一些XDIN的年龄的估计显示,它们的 特征年龄有的可以达到一个兆年的量级。比如, RX J1856.5-3754的特征年龄 为~ 0.5 Myr [26], RX J0720.4-3125的特征年龄为~ 1.3 Myr [26]。因此,存在 一定的把握去认为XDIN这个种族的中子星的年龄偏高。由于XDIN并不表现出 脉冲行为,光学望远镜的灵敏度有限,X射线光子的流量也并不是很高,所以 搜寻和证认这一类中子星是很困难的。现今测到的一些,距离地球都比较近。 很有可能,在银河系当中存在着大量的尚不为人知晓的XDIN,对它们的探测是 目前的观测仪器所不能够达到的。

另有一些中子星,人们将它们归类为中央致密天体(Central Compact Object, CCO)。CCO的观测表现与XDIN有些相似。CCO也不表现出脉冲行为,并且只在软X射线波段表现出热辐射,频谱非常接近黑体谱。与XDIN不同的是,CCO与超新星遗迹成协。因此,它们的年龄可以从与其成协的超新星遗迹的运动作出估计。从已有的一些估计来看,CCO种族的中子星的年龄可

- 10 -

能偏低。举例来说, RX J0822-4300 的年龄为~ 3 kyr [33], 1E 1207.4-5209的 为~ 7 kyr [34]。多数的CCO不表现出脉冲行为,甚至是在软X射线波段的光变 曲线也非常稳定。因此,CCO的周期是比较难确定的。有些研究者认为,由于 几何位形的原因,CCO的辐射束并不扫过地球,使得人们不能观测到这些源发 射的脉冲。

高能计时观测表明,有一些中子星的周期比较长,而且周期的变化率很大。如果以磁偶极模型来衡量,那么这些中子星具有非常强的表面磁场,其强度超过临界磁场(~4.4×10¹⁴G),甚至可以高达~10¹⁵G。反常X射线脉冲星(Anormalous X-ray Pulsar, AXP)是在软X射线波段(<10keV)被首先观测到。起初,它们被认为是普通的双星系统中的中子星[35]。但是,随着X射线观测曝光时间的增加,以及在光学和红外波段的观测表明,这些星体没有伴星[36]。对于它们X射线光度的估计使得人们发现,它们的X射线光度比其自身的自转能损率还要高。这样的一些脉冲星因此而得名反常X射线脉冲星。在伽玛射线波段,人们探测到一些源间或发生短暂的暴发[37]。起初,人们以为是伽玛射线短暴[38]。但后来发现它们同样是一些长周期,强磁场的脉冲星,人们将它们命名为软伽玛射线重复暴中子星(Soft Gamma-ray Repeater, SGR)。近年来的观测表明,AXP和SGR有很多相似之处[39]。因而,理论上对这两类中子星,人们均试图以超磁星(magnetar)的模型去理解[40]。

2.2 样本

在这一小节,我们将介绍在我们的工作中所研究的脉冲星的样本。根据 我们的研究目的,我们专注于有显著热辐射成分的X射线脉冲星。主要的参考 为Yakovlev et al. (2008)对于冷却中子星的整理 [26],Becker & Aschenbach(2002) 对X 射线脉冲星所作的整理 [3],Harberl(2004)总结的XDIN [41],以及Pavlov et al. (2004)对CCO所作的综述 [42]。表2.1中所列的源即为在本工作中重点研究 的脉冲星。另有10 颗星,它们的热光度上限由Becker & Aschenbach(2002) [3]给 出。这10 颗星也被包括在样本中¹。在图2.1中,本文样本中的源被点在了*P* – *P* 图中。表2.1中所列出的星体表面温度*T*_{s,1/2}和辐射区域尺度*R*_{s,1/2}为通过黑体谱 拟合得到。这些值为在无穷远处的观测值,它们与星体本征的表面温度*T*_s和辐

¹这10颗星是: PSRs B1509-58, B1951+32, B1046-58, B1259-63, B1800-21, B1929+10, B0540-69, B0950+08, B0355+54和B0823+26。



图 2.1 周期-周期变化率 $(P - \dot{P})$ 图。本文样本中的X射线脉冲星以蓝点标注于图中。 六角星标注了与超新星遗迹成协的源,五角星标注了不与超新星遗迹成协的源。三角形标 注了4颗XDIN,四边形标注了2颗CCO。图中的直线画出了一颗典型脉冲星(质量1.4 M_{\odot} , 半径10km)与小质量夸克星(质量~ 10^{-2} ~~ $10^{-1}M_{\odot}$)的"死亡线"。死亡线的定出假 设了星体表面偶极磁场强度为 $B = 10^{12}$ G和开放磁力线区的电势差为 $\delta \phi = 10^{12}$ V。磁场的 减弱与/或电势差的增加会导致死亡线上移 [2]。周期与周期变化率的数据取自ATNF Pulsar Catalogue, RX J0822–4300的数据取自Zavlin, Trümper & Pavlov(1999) [1]。

射区域尺度R_s的关系为 [25,26]:

$$T_{\rm s}^{\infty} = T_{\rm s} \sqrt{1 - r_g/R}, R_{\rm s}^{\infty} = \frac{R}{\sqrt{1 - r_g/R}}$$
 (2.1)

这个观测值与本征值的差异是由星体的引力红移效应引起的。在上式中, $r_g = \frac{2GM}{c^2} \approx 2.95 \frac{M}{M_{\odot}}$ km为Schwarzschild 半径 [25,26]。表2.1中前17颗星 被观测到既有热辐射又有非热辐射,它们的非热辐射可能来自于活跃的磁层。因此,将它们列为磁层活跃脉冲星。编号23至29为七颗XDIN,编号5以及编号18至22为6颗CCO。根据它们的观测表现,它们被怀疑为惰性磁层脉冲星。编号为1的源为蟹状星云脉冲星(Crab),它具有的非常明亮的脉冲星星风驱动星云会妨碍对星体本身热辐射成分的探测。表中的Crab数据取自Weisskopf et al. (2004) [43],他们报告了一个Crab表面温度的2 σ 上限,这个限制的得来假设了Crab与地球之间的距离为2 kpc。RX J0822–4300是超新星遗迹Puppis A中的一颗CCO。在二十世纪九十年代,Zavlin,Trüper & Pavlov(1999)曾经根据*ROSAT*空间望远镜的观测来分析这个源。但是,他们发现很难区别围绕中子星的结构是属于超新星遗迹还是脉冲星星风驱动星云 [1]。最近,Hui & Becker(2006)根据*Chandra*和XMM-NEWTON的观测重新对这个源进行了分析,他们认为没有发现RX J0822–4300具有脉冲星星风驱动星云的迹象 [33]。鉴于对这个源存在的争议,我们在本工作中暂时也将其包括在磁层活跃脉冲星的样本中。

2.3 X射线热光度与E的比较

对于磁层活跃的脉冲星,在大量的带电粒子沿开放磁力线加速离开星体的 同时,一部分粒子会沿某一途径回流,重新撞向星体,引起星体的再加热过 程。这个机制可能会导致脉冲星的X射线热光度与星体的自转能损律之间有一 定的关系。在这一小节,我们通过比较这两个量来探索一下这潜在的关系。

在我们选择的磁层活跃脉冲星的样本中,一共有27个源。我们将这27个源分为两组。A组包括在表2.1中的前17颗星,B组除包括这17颗星,还包括由Becker & Aschenbach(2002)提供的另外10颗星,他们为这10颗星提供了热光度的上限 [3]。图2.2中上图所示即为X射线热光度L[∞]_{X,bol}与自转能损律*E*的比较。我们以方程

脉冲星名称,年龄,星体表面温度组分1	, 星体热辐射区域尺度组分 $2(R_2^\infty)$, X 射	
表 2.1 X射线脉冲星的热辐射观测数据。表格中依次列出脉冲星编号,	$(T^{\infty}_{s,1})$, 星体热辐射区域尺度组分1 $(R^{\infty}_{s,2})$, 星体表面温度组分2 $(T^{\infty}_{s,2})$	线热辐射光度Logl和参考文献。

~ 2.5 1.68 ± 0.05 1.66 ^{+0.59} 0.8 ^{+0.59} 0.8 ^{+5.2} ≈ 14	$ \begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
0.0 8.6 112 4.5	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
	$ \begin{array}{lll} \sim 88 & 1.5^{+1.1}_{-0.6} \\ \sim 110 & 0.91 \pm 0.05 \\ \sim 340 & 0.5 \pm 0.01 \\ \sim 540 & 0.79 \pm 0.03 \\ \sim 1200 & \approx 0.9 \\ \sim 7^{-13} & 1.90 \pm 0.01 \end{array} $

- 14 -

续表
表 7

编号	源名称	t (kyr)	$T^{\infty}_{\mathrm{s},1}$ (MK)	R_1^∞ (km)	$T^{\infty}_{s,2}$ (MK)	R_2^∞ (km)	$L^{\infty}_{ m bol} \; (10^{33} \; { m ergs} \; { m s}^{-1})$	参考
19	CXOU J232327.9	0.3	6.14 ± 0.46	$0.41\substack{+0.08\\-0.07}$	I	I	$1.7^{+1.6}_{-0.9}$	(19)
20	+584842 (in Cas A) CXOU J085201.4	< 1.1	4.68 ± 0.06	0.28 ± 0.01	I	I	0.25 ± 0.02	(20)
21	-461753 (in G266.2-1.2) PSR J1852+0040	I	5.10 ± 3.48	0.9 ± 0.2	I	I	3.7 ± 0.9	(21)
22	(III Kes /9) PSR J1713-3949 (in C247 2 0 5)	I	4.4	2.4	I	I	15	(22)
23	RX J1856.5-3754	~ 500	pprox 0.74	5.0	I	I	$pprox 5.2 imes 10^{-2}$	(23)
24	RX J0720.4-3125	~ 1300	≈ 0.94	≈ 6.1	I	I	≈ 0.21	(24)
25	RBS 1223 ^a	~ 400	1.04	0.8	Ι	I	$5.1 imes 10^{-3}$	(25)
26	RX J0420.0-5022	~ 110	$0.66_{-0.54}^{+0.29}$	1.4	I	I	2.7×10^{-3}	(26)
27	RX J0806.4-4123	I	1.09 ± 0.01	≈ 0.6	I	I	$\approx 3.6 \times 10^{-3}$	(27)
28	RX J1605.3+3249	I	1.07	≈1.1	Ι	I	1.1×10^{-2}	(25)
29	RBS 1774 ^b	I	1.04	≈ 1.1	I	I	1.1×10^{-2}	(25)
^a 1RX	S J130848.6+212708							

^b 1RXS J214303.7+065419

^{注:} i) 1E 1207.4-5209(编号18) 的年龄取自Pavlov et al. (2002) [34]对于与其成协的超新星遗迹的估计; ii) RBS 1223和RX J0420.0-5022

的年龄为在本工作中估计的特征年龄; iii)编号为1,3-9,11-12,14-17,23-24的这些源的年龄取自Yakovlev et al. (2008) [26],其它源的年龄取自表格最后一列所列出的参考文献; iv)对于5颗XDIN(编号25至29),其黑体参数的取得中假设了星体的距离为100 pc, (2007) [49] (9) McGowan et al. (2004) [50] (10) Pavlov, Kargaltsev & Brisken(2008) [51] (11) McGowan et al. (2003) [52] (12) McGowan et al. (2006) [53] (13) Possenti, Mereghetti & Colpi(1996) [54] (14) De Luca et al. (2005) [55] (15) Jackson & Halpern(2005) [56] (16) Zavlin & Pavlov(2004) [57] (17) Pavlov et al. (2002) [34] (18) De Luca et al. (2004) [58] (19) Chakrabarty et al. (2001) [59] (20) Kargaltsev et al. (2002) [60] (21) Gotthelf, Halpern & Seward(2005) [61] (22) Pavlov, Sanwal & Teter(2004) [42] (23) Ho et al. (2007) [62] (24) (2004) [45] (4) Gonzalez et al. (2005) [46] (5) Hui & Becker(2006) [33] (6) Zavlin(2007) [47] (7) Halpern et al. (2004) [48] (8) Manzali et al. Kaplan et al. (2003) [63] (25) Haberl(2004) [41] (26) Haberl, Pietsch & Motch(1999) [64] (27) Haberl & Zavlin(2002) [65].

- 15 -

$$\log L_{\rm X,bol}^{\infty} = p1\log E + p2 \tag{2.2}$$

对数据进行了拟合。表2.2中列出了拟合结果。最佳的拟合寓意了一个"½律"的存在,即

$$L_{\rm X \ bol}^{\infty}(\dot{E}) = C\dot{E}^{1/2} \tag{2.3}$$

式中 $C = 10^{p2}$,这个常数的单位为 $erg^{1/2}s^{-1/2}$ 。如果将式(2.2)中的p1固定为1,那么则假设了 $L_{X,bol}^{\infty}$ 与 \dot{E} 之间为线性律,表示为

$$L_{\rm X,bol}^{\infty}(\dot{E}) = \eta \dot{E} \tag{2.4}$$

上式中的 $\eta = 10^{p^2}$ 为 \dot{E} 向 $L^{\infty}_{X,bol}$ 转换的效率。拟合结果显示 $\eta \sim 10^{-3}$ 。这个转换效率与Becker & Trümper(1997)发现的 \dot{E} 向X射线非热光度的转换效率相当 [66]。对于 $\frac{1}{2}$ 律的情况,我们同样可以定义转换效率为

$$\eta(\dot{E}) = \frac{L_{\rm X, bol}^{\infty}}{\dot{E}} = \frac{C}{\dot{E}^{1/2}}$$
(2.5)

该转换效率满足 $\eta(\dot{E}) < 1$,于是 $C < \dot{E}^{1/2}$ 。举PSR B0823+26为例,这 颗星的 $\dot{E} \sim 10^{32}$ erg s⁻¹在样本中为最小,那么其常数C应该满足 $C < 10^{16}$ erg^{1/2} s^{-1/2}。另外,在图2.2的下子图中,我们比较了样本中脉冲星的特征年龄和 \dot{E} 。从中可以看出这样的一个趋势,即随着特征年龄的增加, \dot{E} 趋向于降低。

2.4 夸克星的形成与热演化阶段

2.4.1 夸克星的形成

夸克星的形成可能伴随着超新星。对于质量大约为~ $1M_{\odot}$ 的夸克星,它 们的形成可能是中等质量恒星演化到晚期后发生核塌缩型超新星爆发后所 遗留的残骸。夸克星的质量可以很小,比如在~ $10^{-1}M_{\odot}$ 甚至~ $10^{-2}M_{\odot}$ 的量 级。这样小质量的夸克星的可能的存在势必提出一个它们如何形成的问题。 一种可能的图像同样伴随着超新星,或者说小质量夸克星可能是双星系统 中的白矮星发生的吸积诱发塌缩 (accretion-induced collapse, AIC) 过程形成


图 2.2 $L_{X,bol}^{\infty}$ 与它的比较(上图)和特征年龄与它的比较(下图)。样本中的脉冲星被 分为两组。A组包括表2.1中的前17颗脉冲星,在图中它们以深色的圆点以及它们的编号标 识。B组为整个样本,包括A组中的成员以及由Becker & Aschenbach(2002)所归纳的另外被 定义了热光度上限的10颗星 [3],这10颗星在图中以灰色的圆点和字母标识。上图中的线为 拟合线。红色的线为对A组数据的拟合,而蓝色的线为对B组数据的拟合。在这两组中, 实线给出了最佳的拟合,而虚线给出当把参数p1固定为1时的拟合。注:由字母标识的脉 冲星为a. PSR B1509-58, b. PSR B1951+32, c. PSR B1046-58, d. PSR B1259-63, e. PSR B1800-21, f. PSR B1929+10, g. PSR B0540-69, h. PSR B0950+08, i. PSR B0355+54, j. PSR B0823+26。

- 17 -

组别	$p1^a$	p2	相关系数	χ^2_r (自由度) ^b	
٨	0.4561 ± 0.9215	16.90 ± 9.20		0.2277(14)	
А.	0.4501 ± 0.2315	10.20 ± 8.30	_	0.3277(14)	
	(1)	$-3.280^{+0.495}_{-0.494}$	0.7487	0.8607(15)	
В.	$0.5918^{+0.2045}_{-0.2046}$	$11.66^{+7.3100}_{-7.2990}$	_	0.6081(24)	
	(1)	-2.896 ± 0.403	0.7730	0.9964(25)	

表 2.2 对以 $L_{X \text{ bol}}^{\infty}$ 作为 \dot{E} 函数的数据的拟合结果。

[°]括号中的值表示拟合时被固定。所得参数误差具有95%的置信 度。 ^b 约化 χ^2 ,即每自由度 χ^2 。

的 [67]。设想一颗质量接近Chandrasekhar极限的白矮星,它的质量和半径分别 为 $M_{\rm wd} \sim 1.4 M_{\odot}$, $R_{\rm wd} \sim 10^8 \,\mathrm{cm}$, 引力势能为 $E_{\rm g} \sim \frac{3}{5} \frac{GM_{\rm wd}^2}{R_{\rm wd}} \simeq 3 \times 10^{51} \,\mathrm{erg}$ 。当白 矮星接近Chandrasekhar极限,在星体中心可能会发生强子物质向夸克物质的转 化。计算表明,在这样的转化中每重子会释放最大约为100MeV的能量,这个 潜热相当于一个重子静质量的10% [68]。这样大的能量的释放可能会使强子物 质向夸克物质的转化过程以爆燃的形式出现。爆燃的激波面扫过的最小的质量 范围,即所形成的夸克星的最小质量M_{as.min}可以由下式估计:

$$0.1M_{\rm qs,min}c^2 \simeq E_{\rm g},\tag{2.6}$$

得到 $M_{\text{cs,min}} \simeq 2 \times 10^{-2} M_{\odot}$ 。因此,根据这个估计来看,质量为十分之一和质 量为百分之一太阳质量量级的夸克星可以通过这种途径来形成。具体的质量 值依赖于相变潜热的数值,和白矮星内部发生相变时的爆燃波的波前所能够 扫过的范围。初始形成的夸克星假如没有经历大规模的超Eddington吸积,那 么它的表面可能没有由核物质组成的壳层,夸克物质将直接裸露。下面我们 简单的估计一下形成裸夸克星对于星体质量的限制。设想一个离子,比如说 一个质子,被夸克星吸积。如果说希望使夸克星保持无壳层,那么这粒质子 需要获得足够的动能以穿过星体表面的库仑势垒,撞入星体,相变为夸克物 质。若这颗夸克星的质量和半径分别为 M_{qs} 和 R_{qs} ,则落至星体表面时所具有 的动能为 $\varepsilon_{k} = \frac{GM_{qs}m_{p}}{R_{cs}}$ 。夸克星表面的库仑势全 \mathcal{V}_{q} 是一个模型依赖的量,可能 - 18 -



图 2.3 一颗夸克星的可能的冷却阶段。阶段1:单夸克相。夸克星初始诞生时可能具有 很高的温度(≥10 MeV),星体内部可能是由单个的夸克组成的流体。阶段2:单夸克簇 相。随着温度的降低,夸克之间的强耦合可能会使单独的夸克聚集,形成夸克簇。这是 星体内部可能是由夸克簇构成的流体。阶段3:固态夸克星相。随着温度降低至溶点,流 体夸克簇可能会倾向于固化,形成具有周期性点阵结构的晶格,比如:体心立方密堆结构 (bcc)。

在~ 0.2至~ 20 MeV之间变化 [69,67]。于是,由关系 $\frac{GM_{qs}m_p}{R_{qs}} > \mathcal{V}_q$,可以导出裸 夸克星的质量下限为

$$M_{\rm qs} > M_{\rm qs,lim} = \sqrt{\frac{3\mathcal{V}_{\rm q}^3}{4\pi G^3 m_p^3 \rho}} \simeq 4.6 \times 10^{-4} \mathcal{V}_{\rm q,1}^{3/2} \rho_3^{-1/2} M_{\odot}$$
(2.7)

在上式的推导中对小质量夸克星的质量估计作了近似 $M_{qs} = \frac{4}{3}\pi R_{qs}^3 \rho$,式 中 $\mathcal{V}_{q,1}$ 为以1MeV标度的库仑势垒, ρ_3 为以3倍饱和核物质密度标度的密度值。 从这个评估中可以看出,对于质量为~10–1 M_{\odot} 和~10⁻² M_{\odot} 的夸克星,它们在 形成后有可能保持无壳层状态。除了这里分析的关于超新星的图像,其它天体 物理过程也有可能导致小质量夸克星的形成,比如两颗夸克星的碰撞[70]。

2.4.2 一个可能的夸克星热演化的图像

一颗夸克星的冷却过程在理论上目前是比较难以描述的,特别是从星体的诞生开始。在这里,我们从唯象的角度提出一个夸克星的热演化过程。如 图2.3所示,整个演化可能分为三个阶段。星体刚刚诞生后可能会进入第一个阶 段,如果当时的温度比较高(≳10¹¹K或10MeV)。中微子和光子的剧烈的辐 射会导致星体快速的冷却。随着温度的降低,解禁的夸克可能会倾向于形成夸 克簇,从而在星体内部形成由夸克簇组成的流体。这标志着星体进入了第二个 冷却阶段。随着温度的进一步降低至熔点,夸克簇流体可能会开始固化,形成 具有周期性的点阵结构,比如体心立方密堆结构(bcc)。目前的理论还很难 确定这三个冷却阶段的时标(尤其是对前两个阶段),和两个相变点的温度。 理论上甚至不能确定一颗夸克星的热演化是否会经历全部的这三个阶段。如果 在星体诞生伊始的温度只有大约10¹¹K或更低一些,那么这时的夸克-胶子等离 子体可能已经存在很强的耦合,使夸克簇在星体诞生初期就会很快的形成。而 且,还有可能的是,固态夸克物质的熔点很高(也许就在~10¹¹K的量级), 从而一颗夸克星可能在几乎诞生的同时就进入固态夸克星阶段。

每一个具体演化阶段的光子和中微子的辐射机制可能不尽相同。一颗热的 夸克星(阶段1和2)可能是对于能量大于~20MeV的热平衡光子的一个很好的 辐射体 [70]。这时剧烈的热辐射可能会激发在热的夸克星表面的正负电子对的 产生和辐射。这些正负电子对的湮灭可能会反过来再大量的辐射出热光子。这 个等离子体可能具有足够的光学深度, 使产生一个黑体谱 [71]。中微子的辐射 可能会产生于这种正负电子对过程和星体内部极端相对论电子气所导致的等离 子体过程 [72]。基本的URCA 过程可能是另外一个中微子辐射的组分。当星体 冷却固化进入固态夸克星相之后,热平衡光子(软X射线波段)可能也可以从 固体夸克物质的表面辐射出来。这时的辐射机制可能是自由电子在固体夸克物 质的能带中的跃迁 [28]。电子和声子的相互作用以及电子之间的相互作用可能 会导致一个类金属谱。zhang et al. (2004)对RX J1856.5-3754的热辐射谱作了分 析。他们做出的结论是类金属谱和黑体谱之间没有明显的不同 [73]。因此,黑 体谱对于固态夸克星的热光子辐射可能是一个比较好的近似。目前,理论上尚 不明确固态夸克星相下的中微子冷却的机制。如果星体在一个很高的温度下 (比如~10¹¹K) 就进入固态夸克星相,那么正负电子对过程和等离子体过程 也可能是夸克星在固态状态下的中微子冷却机制。

观测表明X射线脉冲星的表面温度一般为几十至几百电子伏特,或~ 10⁵至~10⁶K(参看表2.1)。在这样的低温下,夸克星很可能已经进入固态 相,并且光子的辐射光度可能远大于中微子的辐射光度。因此,在我们的工作 中,我们重点研习固态夸克星的光子冷却过程。

- 20 -

2.5 固态夸克星的热容

假设一颗固态夸克星在演化过程中其体积的变化可以忽略。那么,该夸克 星的内能U_{SOS}将只是星体温度T_s的函数:

$$U_{\rm SQS}(T_{\rm s}) = \int C_v dT_{\rm s}$$
(2.8)

式中 T_s 是在星体的局部参考系中的测量值,星体的热容 C_v 包括晶格的贡献 C_v^l 和简并电子气的贡献 C_v^e ,或 $C_v = C_v^l + C_v^e$ 。

根据Debye弹性介质理论,固态夸克物质的Debye温度是

$$\theta_D = \frac{\hbar\omega_D}{k_{\rm B}},\tag{2.9}$$

其中ħ是约化Planck常数, $k_{\rm B}$ 是Boltzmann常数。在式(2.9)中, $\omega_D = k_D \bar{c}_s$ 为Debye截至频率,即可以在介质中传播的波的最高频率。Debye波数 $k_D = (6\pi^2 n_c)^{1/3}$,其中 n_c 为夸克簇的数密度。对于固态物质,其平均声速 \bar{c}_s 近似为光速 c_o 如果将MIT口袋模型中的线性状态方程拓展至夸克星,那么压强p将比例 于星体的质量密度 ρ ,即 $p \sim \rho c^2$ 。于是,平均声速 $\bar{c}_s = \sqrt{\frac{q}{\rho}} \sim \sqrt{\frac{\rho}{\rho}} \sim \sqrt{\frac{\rho c^2}{\rho}} = c_o$ 夸克簇的数密度 $n_c = \frac{3\epsilon n_0}{A}$,其中 ϵ 是以饱和核物质密度 n_0 标度的固态夸克星 的重子数密度,这里注明 $n_0 = 0.17 \, \text{fm}^{-3}$ 。在本工作中,我们假设 $\epsilon \sim 3$ 至5可能 适用于固态夸克星,并且在余下的计算中,凡涉及密度之处,均取 $\epsilon = 3$ 。一粒 夸克簇中的价夸克的数目A可能大约为10。已经有研究显示A = 18的"夸克 α " 粒子可能存在 [74,28]。或许我们还可以期待 $A \gtrsim 10^2$ 。根据以上的分析,固态 夸克物质的Debye温度由式(2.9)估计为 $\theta_D \sim 10^{12} \, \text{K}$ 。这个温度甚至可能比星体诞 生时候的温度还要高。于是,根据Debye理论,晶格的热容在低温情况下为

$$c_v^{\rm l} = \frac{12\pi^4}{5} k_{\rm B} (\frac{T_{\rm s}}{\theta_D})^3, \qquad (2.10)$$

其中 c_v^l 是一个夸克簇的热容。对于包含有N个夸克簇的固态夸克星,其晶格部分贡献的热容为 $C_v^l = Nc_v^l$ 。

对于星体内部简并电子气组分,只有分布在Fermi面附近的电子对热容有贡

献。于是,

$$C_v^{\rm e} \sim N_{\rm e} \frac{k_{\rm B} T_{\rm s}}{\varepsilon_F} k_{\rm B},$$
 (2.11)

其中 ε_F 为自由电子气的Fermi能, N_e 为电子总数。在极端相对论情况下, 电子气的Fermi能为 $\varepsilon_F = (\frac{3n_eh^3}{8\pi})^{1/3}c$, 其中 n_e 是电子的数密度, h为Planck常数。 根据MIT口袋模型进行的计算表明, 电子数密度 n_e 可能为夸克物质重子数密度的10⁻⁵ [75]。如果在这里我们取固态夸克物质的重子数密度三倍于普通核物质, 那 $\Delta n_e \sim 5 \times 10^{33}$ cm⁻³。从而 $\varepsilon_F \sim 10$ MeV。图2.4所示为固态夸克物质中晶格组分与电子组分的热容作为温度的函数。可以看出, 当温度低于~ 10¹⁰ K时, 电子组分贡献的热容远大于晶格组分的贡献, 并且这个差异随温度的降低而快速增加。

在对固态夸克物质的热容做出分析之后,我们便可以估计出在只有星体内 能供给的情况下,一颗固态夸克星的冷却时标。我们考虑星体具有典型的脉冲 星质量1.4*M*_☉,涉及的冷却过程的初始温度和末温度分别为10¹¹ K和10⁵ K。我 们说明,因为目前对于固态夸克物质的熔点尚不很清楚,所以将初始温度假定 在10¹¹ K。由能量守恒给出

$$-C_v \frac{\mathrm{d}T_s}{\mathrm{d}t} = 4\pi R^2 \sigma T_s^4 + L_\nu^{\mathrm{pair}} + L_\nu^{\mathrm{plasma}}, \qquad (2.12)$$

其中*R*为星体半径, σ为Stefan-Boltzmann常数。因为这里涉及到了很高的初始 温度,所以我们将正负电子对过程和等离子体过程贡献的中微子的辐射光度, 即*L*^{pair}和*L*^{plasma},考虑在内。关于这两项中微子光度的计算我们参考Itoh et al. (1989)给出的解析方程 [72]。计算结果显示,一颗质量为1.4*M*_☉的固态夸克星 从10¹¹ K冷却到10⁵ K的时标为~18天。这可能意味着固态夸克星在冷却过程中 的能量供给只有一小部分来自于星体本省的内能,大部分的能量可能来源于某 种再加热机制。这一点与中子星的冷却有着本质的不同。

2.6 固态夸克星的再加热

再加热过程可能在固态夸克星的热演化过程中扮演着重要的角色。观测 上,不同的脉冲星可能正在经历着不同的加热过程。我们猜测脉冲星种群中不 同的磁层活动性可能可以成为判别星体正在经历何种加热过程的依据。

- 22 -



图 2.4 固态夸克物质中晶格组分(实线)和简并电子气组分(虚线)对热容的贡献。

2.6.1 自转起源的星体再加热

或许可以定义一类星为磁层活跃脉冲星。在观测上,这类脉冲星往往表现 出比较强的非热辐射,有明显的脉冲,而且有时在星体周围可以见到明亮的脉 冲星星风驱动星云。对于这样的脉冲星,有可能在其两极有大量的相对论星带 电粒子喷出。在这些高能粒子飞离星体的同时,还可能有一部分粒子沿某种途 径重新落回星体。这意味着能量的注入可能会发生于脉冲星极冠区,并扩散至 星体大部分区域 [76,77,78,79]。热流光可以表示为

$$\mathcal{H} \sim \frac{L_{\rm H} - 4\pi r_{\rm p}^2 \sigma T_{\rm p}^4}{\pi r_{\rm p}^2} \sim \kappa \nabla T, \qquad (2.13)$$

其中 $r_{\rm p} \approx R \sqrt{\frac{\Omega R}{c}} \pi T_{\rm p}$ 分别是极冠区的半径和温度。从简单出发,我们可以对温度梯度取一维近似,即 $\nabla T \sim \frac{T_{\rm p} - T_{\rm s}}{R}$ 。在式(2.13)中, $L_{\rm H}$ 为回流加热的光度。 根据§2.3的分析以及考虑到固态夸克星极小的热容, $L_{\rm H}$ 可能遵守与它的" $\frac{1}{2}$ 率" 或者是线性率,即 $L_{\rm H} = C\dot{E}^{1/2}$ 或 $L_{\rm H} = \eta \dot{E}$ 。式(2.13)中, κ 为固态夸克物质的 热导率。由于固态夸克物质的类金属结构,总的热导率应由声子,电子以及杂质三部分贡献:

$$\kappa = \kappa_{\rm p} + \kappa_{\rm e} + \kappa_{\rm i}, \qquad (2.14)$$

-23-

其中脚标"p","e","i"分别表示上述三项贡献组分。作为对固态夸克星所建立 的一个初步的模型,我们暂不考虑杂质。对于类金属结构,电子热导率可能为 主导贡献项,而声子热导率可以忽略[80]。电子热导率可以表示为

$$\frac{1}{\kappa_{\rm e}} = \frac{1}{\kappa_{\rm ee}} + \frac{1}{\kappa_{\rm pe}},\tag{2.15}$$

其中κ_{ee}为电子-电子碰撞的贡献,而κ_{pe}为声子-电子碰撞的贡献。对于这两项的 计算,我们参考Flowers & Itoh(1981)所提供的解析方程 [80]。

2.6.2 吸积起源的星体再加热

正如在§2.2所提及,有一些X射线脉冲星并不表现出明显的非热辐射,没 有与其成协的脉冲星星风驱动星云。这样的观测表现可能意味着这些脉冲星的 磁层不很活跃,可以称它们为惰性磁层脉冲星。从固态夸克星的角度来看,惰 性磁层脉冲星的X射线热辐射可能不会源于星体的自转起源的加热过程。对于 这个种族的脉冲星,一种可能的再加热机制是星体在"螺旋桨"相下的吸积过 程。在"螺旋桨"相下,脉冲星周围会形成一个物质包层,物质包层的内边界 与磁层直接相互作用。其结果是大量的物质被率离星体,但是,存在一定的可 能性使得一小部分物质渗透进来,最终落到星体表面 [81]。在螺旋桨相下,星 体的公转半径r_{co},磁层半径或Alfvén半径r_m和光速圆柱r_L之间应该满足关系:

$$r_{\rm co} = \left(\frac{GM}{4\pi^2}\right)^{1/3} P^{2/3} \lesssim r_{\rm m} = \left(\frac{R^6 B_{\rm p}^2}{\dot{M}\sqrt{2GM}}\right)^{2/7} \lesssim r_{\rm L} = \frac{cP}{2\pi},\tag{2.16}$$

其中,G为引力常熟,M和R分别为星体的质量和半径,B_p为极冠区的磁场强度。在吸积过程中,吸积物质会释放引力能。而且,当这些物质最终落到星体表面时,普通的重子物质会相变为夸克物质,在此过程中可能会释放出每重子~10至100 MeV的潜热。于是,吸积起源的星体加热光度可表示为

$$L_{\rm H} = \frac{GM\eta_{\rm acc}\dot{M}}{R} + \Delta\epsilon \frac{\eta_{\rm acc}\dot{M}}{m_p},\tag{2.17}$$

其中 m_p 为质子质量, $\Delta\epsilon$ 表示相变潜热。上式中 $\eta_{\rm acc}$ \dot{M} 表示在吸积率为 \dot{M} 的情况 下最终在单位时间落到星体表面物质的质量,或者说 $\eta_{\rm acc}$ 表示吸积效率。

- 24 -

2.7 观测数据与理论预期的比较

从固态夸克星的角度来看,磁层活跃的脉冲星会随着它们自身的自转演化 来展示它们的热演化过程。对于惰性磁层脉冲星,它们的持久的X射线热辐射 可能源自于吸积过程。下面,对于这两类脉冲星,我们分别进行观测数据与理 论预期的比较。

2.7.1 磁层活跃脉冲星的冷却

在考虑再加热过程的情况下,由能量守恒给出星体的热演化方程为

$$-C_v \frac{\mathrm{d}T_\mathrm{s}}{\mathrm{d}t} + L_\mathrm{H} = L_{\mathrm{X,bol}} \tag{2.18}$$

考虑到固态夸克星的热容很小,上式等号左边的第一项则可以忽略。那么 将*L*_H = *L*_{X,bol}具体展开,有

$$\frac{C\dot{E}^{1/2}}{\eta\dot{E}} \bigg\} = 4\pi r_{\rm p}^2 \sigma T_{\rm p}^4 + 4\pi R^2 \sigma T_{\rm s}^4$$
(2.19)

上式中,等号左边罗列的两项表示自转起源的加热过程可能遵循的 $\frac{1}{2}$ 率 或线性率,等号右边的两项黑体辐射光度分别来自高温的极冠区和低温 的星体大部分区域。联立式(2.19)和(2.13),并且以垂直的磁偶极子 为星体的自转演化建模,固态夸克星的热演化曲线遍可以画出。在计算 中,我们假定偶极子的磁场强度为恒定值 10^{12} G。我们将观测数据与理论 计算出的冷却曲线展示在图2.5($\frac{1}{2}$ 率)和图2.6(线性率)中。在这两张图 中,左图为星体主体温度而作,而右图展示的是星体极冠区与主体的温 差 $\Delta T = T_p - T_s$ 的情况。因为我们发现,对于RX J0822-4300, PSRs B0833-45,B0656+14,J0633+1746和B1055-52,这些星体表现出双黑体辐射成分, 一个可能来自星体主体,一个可能来自极冠区。对于PSR J0633+1746,Jackson & Halpern(2005)发现这颗星以前被认为的表现出的温度不均匀性可能不真。 如果在拟合PSR J0633+1746的相位解析的X射线谱时不将幂率成分的谱指数固 定,那么对于一个高温的黑体辐射成分的引入就将会是一个人为的效应[56]。 在表2.1中,我们以编号15′标记他们的结果。对于这个情况(编号15′),我们

- 25 -

表 2.3 由固态夸克星的冷却模型估算的17颗脉冲星的转动惯量。第5列所列出的是由¹₂率估计出的结果,而第6列给出由线性率估计出的结果。除RX J0822-4300外,其它星体的自转参数取自ATNF Pulsar Catalogue。RX J0822-4300的自转参数取自Zavlin, Trümper & Pavlov(1999) [1]。

编号	脉冲星	ν (s ⁻¹)	$\dot{\nu}$ (s ⁻²)	$I_{45}^{a}C^{2}$	$I_{45}\eta$
1	PSR B0531+21 (Crab)	30 225437	-3.862×10^{-10}	7.7×10^{29}	4.1×10^{-5}
2	PSR J1811-1925	15.463838	-1.052×10^{-11}	_	_
3	PSR J0205+6449	15.223856	-4.495×10^{-11}	5.8×10^{28}	4.6×10^{-5}
4	PSR J1119-6127	2.452508	-2.419×10^{-11}	1.7×10^{30}	8.5×10^{-4}
5	RX J0822-4300	13.2856716499(3)	$-2.6317(3) \times 10^{-11}$	2.7×10^{30}	2.8×10^{-4}
6	PSR J1357-6429	6.020168	-1.305×10^{-11}	4.4×10^{28}	1.2×10^{-4}
7	RX J0007.0+7303	3.165922	-3.623×10^{-12}	3.5×10^{27}	8.8×10^{-5}
8	PSR B0833-45 (Vela)	11.194650	-1.567×10^{-11}	1.4×10^{28}	4.5×10^{-5}
9	PSR B1706-44	9.759978	-8.857×10^{-12}	4.2×10^{28}	1.1×10^{-4}
10	PSR B1823-13	9.855532	-7.291×10^{-12}	3.2×10^{28}	1.1×10^{-4}
11	PSR J0538+2817	6.985276	-1.790×10^{-13}	4.3×10^{30}	9.3×10^{-3}
12	PSR B2334+61	2.018977	-7.816×10^{-13}	1.8×10^{29}	1.7×10^{-3}
13	PSR B1916+14	0.846723	-1.523×10^{-13}	1.8×10^{29}	5.9×10^{-3}
14	PSR B0656+14	2.598137	-3.713×10^{-13}	1.1×10^{31}	1.7×10^{-2}
15	PSR J0633+1746 (Geminga)	4.217640	-1.952×10^{-13}	3.2×10^{28}	9.9×10^{-4}
16	PSR B1055-52	5.073371	-1.501×10^{-13}	6.9×10^{30}	1.5×10^{-2}
17	PSR J2043+2740	10.402519	-1.374×10^{-13}	7.1×10^{27}	3.5×10^{-4}

^a $I_{45} = I/(10^{45}\,\mathrm{g\,cm^2})$

在这里假设PSR J0633+1746仍存在表面温度的不均匀性,并且假定温差的上限 为低于星体大部区域温度一个量级。固态夸克星的模型在自转能损率与热光度 之间建立了联系,这可以反过来帮助估计脉冲星的转动惯量。表2.3列出了17颗 磁层活跃脉冲星的估计出的转动惯量值。可以看出,多数的转动惯量值要小于 一颗脉冲星的典型的转动惯量10⁴⁵g cm²。

2.7.2 惰性磁层脉冲星的X射线热光度

正如在§2.6.2中讨论的,惰性磁层脉冲星的X射线热光度可能起源于星体在 螺旋桨相下的吸积,吸积物质可能是来自于超新星遗迹的回落盘或者是星际 介质。似乎可以从的自转参数P和P的测量估计惰性磁层脉冲星的表面磁场, 从而估计这类星体的磁层半径。不过,在吸积相下的脉冲星的P有可能被吸 积所产生的力矩主导,因此,通过上述途径估计的磁场可能不准确。考虑式 (2.17),在螺旋桨相吸积下的惰性磁层脉冲星的X射线热光度可表示为









质量(M⊙)	$\frac{\dot{M}}{\mu}(10^{-9}M_{\odot}{ m yr}^{-1})$	$rac{L_{ m X,bol}}{\mu\eta_{ m acc}} (10^{38}{ m ergs^{-1}})$
10^{-2}	2.7	1.7×10^{-1}
10^{-1}	5.7	4.7×10^{-1}
1.0	12.4	2.0

表 2.4 固态夸克星在螺旋桨相吸积下的热X射线光度。表中第二列所给出的是 相应固态夸克星的Eddington吸积率。计算热光度时,相变潜热取 为 $\Delta \epsilon = 100 \, {\rm MeV}$ 。

$$L_{\rm X,bol} = \frac{GM\eta_{\rm acc}\mu\dot{M}_{\rm Edd}}{R} + \Delta\epsilon \frac{\eta_{\rm acc}\mu\dot{M}_{\rm Edd}}{m_p},$$
(2.20)

式中 $\mu = \frac{\dot{M}}{M_{Edd}}$ 为以Eddington吸积率标度的星体的吸积率。在表2.4中,我们给出质量分别为10⁻² M_{\odot} ,10⁻¹ M_{\odot} 和1 M_{\odot} 的固态夸克星的Eddington光度和热X射线光度。从中可以看出,目前对于XDIN和CCO观测到的X射线热光度(~10³⁰至~10³³ erg s⁻¹),可以由不同的吸积率和吸积效率而得到解释。

2.8 结论与讨论

在这项工作中,我们整理了29颗孤立X射线脉冲星在热辐射方面的观测数据。在固态夸克星的模型下,为具有活跃磁层表现的脉冲星描绘了热演化的曲线,为可能的具有惰性磁层的脉冲星解释了观测到的稳定的X射线热光度。基于由27颗活跃磁层脉冲星组成的样本,我们探索了X射线热光度与星体自转能损率之间的关系,并且通过这个关系,估计出脉冲星的转动惯量。在以前的研究中发现,如果用黑体模型对脉冲星的X射线热谱进行拟合,那么往往得到比较小的热辐射区域尺度。最近,Pavlov & Luna(2009)在对Cassiopeia A的中央致密天体的研究中发现,即使在拟合中使用氢大气模型,所得到的辐射区尺度还是显著的小于标准中子星的半径 [82]。夸克星有着与中子星截然不同的状态方程与内部结构,夸克星的质量可以比较小,因而具有可能比较小的半径。对于质量为10⁻²*M*_☉,10⁻¹*M*_☉和1*M*_☉的固态夸克星,其半径分别为~1.8,~3.8和~8.3km。我们因此得出结论,这个固态夸克星的唯象模型

- 29 -

目前可能尚不能被对于脉冲星的X射线热辐射的观测所排除。不过,我们应该 了解到由于目前的理论所限,现在还难以完整的描述一颗夸克星的热演化过 程。X射线脉冲星的不同的观测表现,可能暗示了它们所处的不同的状态,属 性或者是演化的历史。下面,我们从自转能驱动的脉冲星和吸积能驱动的脉冲 星这两方面展开一些讨论。

2.8.1 自转能驱动的脉冲星

自转能量损失是脉冲星的一个重要的能量来源。这个能量可能驱动了在多 波段观测到的显著的非热辐射,并且可能也是脉冲星星风驱动星云的辐射的能 量来源。在以前的研究中,利用当时已有的样本,人们比较了高能波段的辐射 光度和自转能损率之间的关系。Becker & Trümper(1997)发现非热X射线光度与 自转能损率的关系为 $L_X = 10^{-3}\dot{E}$ [66]。Thompson et al. (1997)报告 γ 射线光度正 比于自转能损率的平方根,或 $L_{\gamma} \propto \sqrt{\dot{E}}$ [83]。由图2.2中的下图我们可以发现, 年轻的脉冲星具有比较大的 \dot{E} 。于是,我们可能可以得到这样的判断:脉冲星 越年轻,自转能损率越大,高能辐射越强。这里,我们发现在X射线热光度与 自转能损率之间可能存在一个" $\frac{1}{2}$ "率或者是线性率。对于线性率,换能效率 与X射线非热光度相似,也为~10⁻³。

2.8.2 吸积能驱动的脉冲星

XDIN和CCO可能是惰性磁层脉冲星种族的代表,它们的X射线辐射的能量来源可能还是一个未知数。比如,1E 1207.4-5209,RX J1856.5-3754和RX J0720.4-3125的X射线热光度分别超出它们各自的自转能损率~60倍,~15倍和~45倍。这些星体可能不是自转供能的。

CCO可能是弱磁化,长初始周期脉冲星的代表。弱磁场与长周期所导致的结果是,这类星体沿开放磁力线区的电势差可能远小于~10¹²V,初级粒子不能被有效加速而产生显著的非热辐射,从而反映出一个惰性的磁层。因此,CCO可能是一类诞生后即不活跃的脉冲星。用黑体谱拟合X射线热辐射的结果显示,这类星体的热辐射区域往往很小,显著的小于中子星模型的半径。或许,这些拟合得到的辐射区尺度反映的是星体表面的一块热斑(可能是极冠区)。但是,从CCO往往比较小的年龄推测,星体主体可能还不应该冷却到不足以被任何X射线望远镜观测到。或许CCO的小辐射区意味着夸克星的存在。CCO的热X射线辐射光度可能来源于对于超新星爆发后对回落物质的吸

– 30 –

积,这一点已经被很多研究者们提出 [59,60,84,85]。

XDIN具有比较大的特征年龄和比较强的磁场。有一种观点认为,XDIN可能由超磁星演化而来,并且由衰减的磁场供能 [41,86]。有一些观测表明,XDIN周围可能存在吸积盘,它们也许是吸积供能的 [87]。或许XDIN是正常脉冲星演化的产物,在自转能基本枯竭的时候,由于对周围介质的吸积使得它们还可以维持X射线辐射。一些XDIN的X射线光谱中具有吸收线,这与CCO相似。假如这些吸收线是电子回旋线,那么XDIN的磁场可能实际上比较小。根据计时观测所得到的较大的周期变化率,可能主要来源于螺旋桨相的吸积,而非星体本身的磁偶极制动。因此,XDIN也许是CCO演化的产物,这二者也许都可被归类为诞生时即不活跃的脉冲星。

很多的X射线脉冲星具有非常相似的热观测特征。在以前的研究中,人们 可能很难区分哪些脉冲星有自转功能,而哪些由吸积供能。我们发现也许脉冲 星的磁层活动性是一个很好的鉴别标志。对于自转供能的正在处于冷却过程中 的脉冲星,如果回流粒子的加热在热演化过程中起显著的作用,那么这些星体 很可能在观测上伴随着明显的非热辐射,甚至有脉冲星星风驱动的星云。如果 一些脉冲星不具备上述观测特征,反映出一个惰性的磁层,那么这些星体有可 能不由转动供能,而可能为吸积供能。

第三章 一项对于射电脉冲星自转频率跳变的观测研究

3.1 引言

正如在第一章里所描述的,脉冲星被认为是高度磁化的,快速旋转的中子 星。它们是非常稳定的转子,从而可以被用来检验Einstein的广义相对论 [88], 探测引力辐射 [89]和构建脉冲星时间标准 [90]。这些成果的取得均通过脉冲星 计时观测的技术来实现。计时观测将实际测量的脉冲到达时间与预测的脉冲到 达时间作比较。预测的脉冲到达时由计时模型得到,计时模型包括脉冲星脉冲 频率,位置还有双星轨道等参数。实际测量的脉冲到达时与预测的脉冲到达时 之差即为"计时残差"。计时残差可以由计时模型中的参数的不确定性引起, 或者由脉冲在从脉冲星到地球观测者之间的传播过程中尚有一些不为人知的效 应所产生。一些脉冲星的计时残差是很小的。举例来说,PSR J0437-4715的数 年的计时观测显示,这颗星的方均根计时残差为~55 ns [91]。但是,多数的脉 冲星并不像这样稳定。Hobbs et al. (2010)分析了366颗脉冲星的计时残差,其 中每颗星的观测时段在10年以上 [92]。他们发现典型的计时残差包含有低频特 征,并且年轻脉冲星的计时残差显示出脉冲频率跳变的恢复特征。

脉冲频率跳变(以下简称"跳变")是脉冲星的脉冲频率的突然增加。 跳变现象经常被指数形式的恢复特征所跟随,脉冲频率在跳变之后会指数式 的演化到跳变发生前的脉冲发射规律上。后跳变的脉冲行为有时会表现出另 外一种形式的恢复过程,即在脉冲频率变化率|*i*|中所观测到的线性的递减。 这种递减往往始于指数恢复的结束,而止于下一次跳变的出现。这种线性衰 减过程是首先在船帆座(Vela)脉冲星中被观测到的 [93],随后在其它的一些 脉冲星的计时行为中,这种现象也有所表现 [94]。人们首次观测到跳变现象 是在Vela脉冲星中 [14,15]。从那以后,数百个跳变已经在很多的脉冲星中被 观测到。对于跳变现象,现在已经存在两个数据库,一个为Jodrell Bank天文 台提供的Jodrell Bank Glitch Catalogue¹ [95],一个为澳大利亚国家射电天文台 (Australia Telescope National Facility, ATNF)提供的ATNF Pulsar Catalogue glitch table² [96]。自从发现首个跳变以来,Vela 脉冲星已经被观测到一共发生了16次 跳变,在这些跳变中,Vela的脉冲频率通常的比例增加量为Δν_g/ν~10⁻⁶。

¹http://www.jb.man.ac.uk/pulsar/glitches.html

²http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/glitchTbl.html

与Vela脉冲星相反,蟹状星云脉冲星(Crab)在其多数跳变中,脉冲频率的比例增量为 $\Delta \nu_{\rm g}/\nu \sim 10^{-7} - 10^{-9}$ 。脉冲频率跳变现象从普通射电脉冲星,到超磁星 [97,98],甚至到毫秒脉冲星均有所发现。目前,人们已经探测到数百个跳变,比例尺度分布在~ 10^{-10} 到~ 10^{-5} 。

很多观测显示跳变发生时脉冲频率的上升沿通常似乎只是简单的上升而缺乏特征,指数恢复的时标多为几十到几百天 [99,94]。但是,高时间分辨率的观测表明1)脉冲的上升沿实际上是有结构的 [100],2)非常短时标的指数衰减是存在的 [101]。在两颗脉冲星的后跳变计时残差中,正弦式的振荡结构也已经被观测到 [102,103]。在PSR B1822-09和其它的一些脉冲星中,人们还观测到了一种被称为"慢"跳变的现象 [104,105,106,94]。与正常的跳变不同,一个慢跳变完成的时标在几百天左右,并且上升后的脉冲频率并不恢复,而是将状态一直保持到下一次跳变事件的发生。在脉冲频率变化率|*i*|中,我们可以观察到一个相应的涨落,或者说是一个脉冲式的减少伴随着随后逐渐的增加。

跳变事件,在理论上,被认为是由中子星壳层破碎导致的星震(见, 比如,Ruderman 1991 [107],Ruderman et al. 1998 [108])或是由大规模的 角动量从壳层超流体到星体主体的转移(见,比如,Anderson & Itoh 1975 [109],Ruderman 1976 [110],Alpar et al. 1981 [111])所触发的。后跳变的指数 式的恢复被认为是中子星内部的涡线缓移区中的钉扎与去钉扎之间的动态平 衡的重构 [112,113]。Espinoza et al. (2011)在研究了当时最大的跳变样本之后发 现比例跳变尺度的分布呈现一种双峰结构,一个峰在~10⁻⁹,一个在~10⁻⁶。 他们还发现特征年龄为大概10 kyr的脉冲星发生跳变最为频繁,并且,对于 脉冲变化率|*i*/在10⁻¹⁴和10⁻¹² s⁻²之间的脉冲星,跳变事件逆转了大约1%的自 转减慢 [95]。Melatos et al. (2008)发现7颗脉冲星的跳变间的时间间隔服从常 数率的Poisson过程,这可能意味着中子星是一个围绕某种临界状态振荡的系 统 [114]。

尽管针对跳变现象已经有很多深入的研究,但是理论上还无法完全解释由 跳变现象所引起的计时残差。理论上同样还不能够解释为什么有的脉冲星出现 过很多次跳变而有些特征年龄相仿的脉冲星却没有被发现经历过一次跳变。在 我们的这项工作中,我们在总时间跨度为1911年的数据当中搜索脉冲星跳变事 件,试图对跳变现象作进一步的研究。

- 34 -



图 3.1 周期-周期一阶导数图。样本中的脉冲星由一个小叉子标记,样本中观测到有跳变的脉冲星用一个三角形标志表示。其它脉冲星由小圆点标记。数据来自ATNF Pulsar Catalogue。

3.2 观测

本工作中的对于165颗脉冲星的观测数据来自澳大利亚Parkes天文台的64米 口径射电望远镜。早期的数据来自一些针对特征年龄较小脉冲星的观测项目, 这些项目旨在研究这些脉冲星的计时行为的属性。观测时使用了多波束接收机 的中央波束和H-OH接收机,并且观测在20-cm波段下进行 [115]。在后端,一 台模拟滤波器组被用于记录脉冲轮廓的总强度 [116]。对每一个源,积分时间 为1至10分钟。从2007年2月到2011年1月的数据来自Fermi观测项目,这个项目 的主要目标是支持Fermi伽玛射线空间望远镜,通过在射电波段观测脉冲星为 伽玛射线波段提供星表 [117,118]。观测大概每四周进行一次,每次观测持续 约24小时,遍历~170颗脉冲星。Fermi观测项目同样使用多波束接收机的中央 波束,并且接收机在1369 MHz下运行,带宽为256 MHz。观测时,对每一颗脉 冲星的积分时间为2至20分钟,以保证信噪比大于5,数据由一台数字滤波器组 记录。另外,近期的一些数据取自PULSE@Parkes观测项目 [119]。在这项工作 中所用到的所有数据均可以从Parkes pulsar data archive¹下载 [120]。

¹http://datanet.csiro.au/dap

在表3.1中,我们列出165颗脉冲星的基本观测量,这些脉冲星的数据的时段在5年以上,它们将作为在本工作中搜索跳变事件的样本。表中依次列出脉冲星名,脉冲周期,周期一阶导数,色散测量,数据时段和观测数目。表中最后一列示出是否此脉冲星以前从未被观测有过跳变(N),是否在我们的观测中显示出跳变(Y),是否有跳变记录但先于我们的观测(P)。图3.1为周期-周期一阶导数图,其中画叉的标记表示本工作样本中的脉冲星,三角形标志表示在我们的观测中显示出跳变的脉冲星。周期-周期一阶导数的数据来自ATNFPulsar Catalogue¹ [96]。

3.3 数据分析

后观测的数据处理使用脉冲星数据分析软件包PSRCHIVE [121]。每一次观测都在时间,频率和偏振上进行叠加来得到平均脉冲轮廓。然后,每一个平均脉冲轮廓与一个具有很高信噪比的脉冲轮廓模板进行交叉相关以得到其脉冲到达时(time-of-arrival, TOA)。计时残差由脉冲星计时软件包TEMPO2生成[122,123],其中美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratories, JPL)的太阳系星表DE405 [124]被用来将TOA推算到太阳系质心(Solar System barycentre, SSB)。每一个观测到的TOA被首先定义在"地球时"时标(terrestrial time, TT)下,然后在TEMPO2中被转换到"太阳系质心系时"时标(Barycentric Coordinate Time, TCB)下。地球时由国际原子时(International Atomic Time, TAI)来实现。对每一颗脉冲星,TEMPO2被用来寻找一组参数,以得到相位连贯的计时解。这组参数包括脉冲频率,脉冲频率一阶导数等。脉冲频率的二阶导数只有在比较明显的三次曲线出现的情况下才会被参与到拟合中。对于存在跳变或即使没有跳变但计时噪声非常强的脉冲星,跨越整个数据时段的计时解 是不能够得到的。对于这些情况,我们需求得分段计时解。

为了得到精确的计时解和跳变参数,我们需要有很准确的脉冲星位置参数。首先,我们使用ATNF Pulsar Catalogue提供的位置和自行(若提供)参数来参与到拟合中,得到初步的计时解。然后,我们应用"Cholesky"方法[125]对位置进行拟合,这种方法考虑了脉冲星计时残差之间的相关。在拟合位置时,对于存在跳变的脉冲星,我们选择最长的无跳变数据段。对于某些计时噪声非常显著的脉冲星,当计时解跨越的时段比较长时,可能需要手动的加入附加相位。对于这种情况,我们选择最长的无附加相位的数据段进行对位置的拟合。

¹http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/; 版本1.43

表 3.1 本工作样本中的脉冲星。这些星已由Parkes天文台观测5年以上。

PSR J	PSR B	P (s)	$\dot{P}_{(10^{-15})}$	DM (cm ⁻³ pc)	数据时段 (MJD)	TOA数目	有跳变 (Y/N/P)
J0108-1431	-	0.807565	0.08	2.38	49373 — 55144	135	N
J0401-7608	B0403-76	0.545253	1.54	21.60	53033 - 55144	58	N
J0536-7543	B0538-75	1.245856	0.56	17.50	48957 — 55144	103	N
J0630-2834	B0628 - 28	1.244419	7.12	34.47	51524 - 55144	62	N
J0729-1448	-	0.251659	113.29	92.30	54218 — 55429	85	Y
J0738-4042	B0736-40	0.374920	1.62	160.80	52995 — 55144	73	Ν
J0742-2822	B0740 - 28	0.166762	16.82	73.78	49364 — 55579	481	Y
J0834-4159	-	0.121116	4.44	240.50	51299 — 55145	120	Y
J0835-3707	-	0.541404	9.78	112.30	50940 — 53948	62	N
J0835-4510	B0833-45	0.089328	125.01	67.99	49608 — 55172	667	Y
J0855-4644	-	0.064686	7.26	238.20	51158 — 55144	225	Ν
J0857-4424	-	0.326774	23.34	184.43	51899 — 55144	94	Ν
J0901-4624	-	0.441995	87.49	198.80	50849 - 55144	127	N
J0905-5127	-	0.346287	24.90	196.43	49363 - 55145	101	Y
J0908-4913	B0906-49	0.106755	15.15	180.37	48957 — 55182	271	Ν
J0940-5428	-	0.087545	32.87	134.50	50941 — 55144	163	Ν
J0942-5552	B0940 - 55	0.664367	22.85	180.20	48928 - 53948	181	N
10954 - 5430	-	0.472834	43 91	200.30	50940 - 55182	106	N
J1012 - 5857	B1011-58	0.819911	17 69	383.90	50536 - 53948	64	N
J1012-5719	-	0.139882	57.37	278.70	51215 - 55182	166	N
11016-5819		0.087834	0.70	252 10	50940 - 55144	77	N
11016-5857	-	0 107386	80.83	304.20	51299 - 55429	250	V
11010-5740	-	0.167400	20.05	1030 40	51158 - 55182	200	N
11020-6026	-	0.102499	20.08	445.00	52854 - 55182	67 67	IN N
J1020 - 0020 J1038 - 5831	- B1036-58	0.140480	1.25	72.74	52654 - 53162 50536 - 53948	61	N
	21000 00	0.001//2	1.20	14.13	55555 55740		.,
J1043-6116	-	0.288602	10.40	449.20	51158 — 55182	75	N
J1047-6709		0.198451	1.69	116.16	50538 - 53948	62	Ν
J1048-5832	B1046-58	0.123671	96.32	129.10	47910 — 55183	353	Y
J1052-5954	-	0.180592	19.98	491.00	54220 - 55460	54	Y
J1057-5226	B1055-52	0.197108	5.83	30.10	49363 — 55182	291	Ν
J1105-6107	-	0.063193	15.83	271.01	49589 — 55461	297	Y
J1112-6103	-	0.064962	31.46	599.10	50850 - 55207	178	Y
J1114-6100	B1112-60	0.880820	46.09	677.00	50538 — 53948	54	N
J1115-6052	-	0.259777	7.23	228.20	50849 — 55205	97	Ν
J1119-6127	-	0.407963	4020.22	707.40	50852 — 55576	348	Y
J1123-6259	-	0.271434	5.25	223.26	50400 — 55205	182	Р
J1136-5525	B1133-55	0.364706	8.22	85.50	51844 - 53948	33	Ν
J1138-6207	-	0.117564	12.48	519.80	50849 - 55205	129	Ν
J1152-6012	-	0.376570	6.68	74.00	51216 - 53948	54	N
J1156-5707	-	0.288409	26.45	243.50	51944 — 55205	67	Ν
11216-6223	-	0 374047	16.82	786-60	50851 - 55205	61	Ν
J1224-6407	B1221-63	0.216476	4.95	97.47	48330 - 55205	661	N
J1248 - 6344		0.198335	16.92	433 30	51260 - 55205	78	N
J1301 - 6305	-	0.184528	266 75	374 00	50941 - 55104	177	Y
J1305-6203	-	0.427762	32.14	470.00	50940 - 55205	58	N
11316-6232	-	0 342825	5 30	983 30	49589 - 53948	163	N
11320-5350	B1317-53	0 279729	9.25	97.60	50536 - 55205	178	N
I1327 - 6400	51517-55	0.280678	31.18	680.00	50940 - 55205	63	N
I1328 - 4357	B1325-43	0.230678	3.01	42.00	50738 - 53948	88	P
J1341-6220	B1338-62	0.193340	253.11	717.30	49540 - 55461	258	Y
11240 6120		0.250262	5.10	284 60	50040 55205	71	NT
J1349-0130	- D1256 60	0.259363	5.12	284.60	30940 - 55205	(1	IN N
J1359-6038	B1326-60	0.12/501	6.34	293.71	48330 - 55205	001	N
J1412-0145	-	0.315225	98.00	514.70	JU830 - 55461	109	Y
J1413-0141	-	0.285625	335.44	077.00	51100 55461	198	Y
J1420-6048	-	0.008180	83.1/	358.80	31100 - 55461	272	Ŷ
J1452-5851	-	0.386625	50.71	262.40	51088 — 55205	120	Ν
J1452-6036	-	0.154991	1.45	349.70	54220 - 55461	52	Y
J1453-6413	B1449 - 64	0.179485	2.75	71.07	50669 — 55205	143	Y
J1456-6843	B1451 - 68	0.263377	0.10	8.60	48330 — 55205	222	Ν
J1509-5850	-	0.088922	9.17	140.60	51214 — 55205	155	Ν
J1512-5759	B1508-57	0.128694	6.85	628.70	51527 — 55205	85	Ν
J1513-5908	B1509-58	0.150658	1536.53	252.50	47913 - 55205	384	N
J1514-5925	-	0.148796	2.88	194.10	51220 - 55205	66	N
J1515-5720	-	0.286646	6.10	482.00	51391 - 55205	54	N
11524-5625	-	0.078210	38.95	152.00	51214 - 55205	122	N
01024 - JU2J	-	0.070219	50.75	102.10	51214 - 55205	تش نش د	1.4

表 3.1 续表

PSR J	PSR B	P	$\dot{P}_{(10^{-15})}$	DM	数据时段	TOA数目	有跳变?
		(8)	(10)	(cm pc)	(NJD)		(1/N/P)
J1524-5706	-	1.116049	356.47	833.00	51101 - 55205	110	Ν
J1530-5327	-	0.278957	4.68	49.60	51013 - 55205	113	Ν
J1531-5610	-	0.084202	13.74	110.90	51215 - 55461	161	Y
J1538-5551	-	0.104675	3.21	603.00	51300 - 55205	81	N
J1539-5626	B1535-56	0.243392	4.85	175.88	49358 — 55205	261	Р
I1541-5535	_	0 295838	75.02	428.00	51300 - 55205	69	N
I1543 - 5459	_	0.377119	52.02	345 70	51300 = 55205 50941 = 55205	113	N
J1548-5607	-	0.170934	10.74	315.50	50941 - 55205	127	N
J1549-4848	-	0.288347	14.11	55.98	49358 — 55205	239	Ν
J1551-5310	-	0.453394	195.13	493.00	51099 — 55205	152	Ν
11557 4259		0 220197	0.22	144 50	50529 52049	E 4	N
J1557 - 4258 J1559 - 5545	- B1555_55	0.529187	20.48	212 00	10350 - 53948 10350 - 53048	117	N
J1600 - 5044	B1555 = 55 B1557 = 50	0.192601	5.06	260.56	50618 - 55205	128	N
J1601-5335	-	0.288457	62.37	194.60	50941 - 55205	118	N
J1602 - 5100	B1558 - 50	0.864227	69.58	170.93	47913 — 55205	246	Ν
J1611-5209	B1607-52	0.182492	5.17	127.57	51526 - 55205	80	N
J1614-5048	B1610-50	0.231694	494.94	582.80	4/910 - 55461	413	Y
J1625-4949	-	0.725752	42.09	183.30	50851 - 55975	57 71	IN N
11620 - 4807 11627 - 4706	-	0.293928	17.40	456 10	50941 - 55205	84	N
J1027-4700	-	0.140740	1.75	450.10	52807 - 55205	04	14
J1632-4757	-	0.228564	15.07	578.00	51216 - 55205	92	Ν
J1632-4818	-	0.813453	650.42	758.00	50852 - 55182	135	Ν
J1637-4553	B1634-45	0.118771	3.19	193.23	50669 — 55205	132	N
J1637-4642	-	0.154027	59.20	417.00	51393 — 55205	86	N
J1638-4417	-	0.117802	1.61	436.00	51633 — 55205	82	Ν
11638 - 4608	_	0 278137	51 50	424 30	51089 - 55205	75	N
J1630 - 4000 J1640 - 4715	B1636-47	0.517405	42.03	591.70	51528 - 55205	39	N
J1643-4505	_	0.237383	31.83	484.00	52738 - 55205	44	Ν
J1644-4559	B1641-45	0.455060	20.09	478.80	47913 - 55101	298	Р
J1646-4346	B1643-43	0.231603	112.75	490.40	47913 — 55273	305	Y
11640 4611		0.164050	22.75	000.00	51016 55005	50	N
J1048-4011	-	0.164950	23.75	392.90	51210 - 55205	73	IN N
J1049-4033	-	0.337019	49.74	210 70	51089 - 55205	93	IN N
11650 - 4921	-	0.156399	1.82	229.90	50941 - 55205 52983 - 55205	69	N
J1702-4128	-	0.182136	52.34	367.10	52985 - 55205 51089 - 55205	87	N
J1702-4310	-	0.240524	223.78	377.00	51223 - 55461	125	Y
J1705-1906	B1702-19	0.298987	4.14	22.91	51901 - 55206	75	N
J1705-3950	- D1706 44	0.318941	60.60	207.10	5121/ - 55205	63	N
J1709 - 4429 J1713 - 3949	B1/00-44	0.102439	92.98	342.00	47910 - 53507 51557 - 54504	395 84	I N
31/15 5/4/		0.572451		042.00	51557 54504	04	14
J1715-3903	-	0.278481	37.69	313.10	51217 - 55205	111	Ν
J1718-3718	-	3.378574	1613.59	371.10	51244 - 54859	100	N
J1718-3825	-	0.074670	13.22	247.40	50878 - 55507	164	Y
J1721-3532	B1718-35	0.280424	25.19	496.00	51879 - 55205	96	N
J1/22-3/12	B1/19-3/	0.236173	10.85	99.50	49363 — 55205	197	N
J1723-3659	-	0.202722	8.01	254.20	50851 - 55205	102	Ν
J1726-3530	-	1.110132	1216.75	727.00	50681 - 55205	147	Ν
J1730-3350	B1727-33	0.139460	84.83	259.00	50539 — 55507	182	Y
J1731-4744	B1727-47	0.829829	163.63	123.33	48184 — 55507	222	Y
J1733-3716	B1730-37	0.337586	15.05	153.50	51893 — 55205	80	Ν
11734-3333		1 160008	2278.08	578.00	50686 55205	136	N
J1735 - 3258	-	0.350963	26.08	754.00	51393 - 55205	64	N
J1737-3137	-	0.450432	138.76	488.20	54221 - 55507	59	Y
J1737-3555	B1734-35	0.397585	6.12	89.41	52003 - 53948	21	Ν
J1738-2955	-	0.443398	81.86	223.40	51158 — 55205	63	Ν
11720 2002	D1726 20	0 222002	7 00	190 50	50720 55205	156	р
J1/39-2903 J1730-3022	D1/30-29	0.522882	/.88	138.30	51870 55205	08	r N
J1737 = 3023 J1740 = 3015	- B1737_20	0.114308	466.12	152.15	50660 55507	90 100	V
J1745 = 3015 J1745 = 3040	B1742 - 30	0.367429	10.12	88.37	51901 - 55205	121	Ň
J1752-2806	B1749-28	0.562558	8.13	50.37	47911 - 55083	177	N
J1756-2225	-	0.404980	52.69	326.00	51217 — 54564	47	N
J1757-2421	B1754-24	0.234101	12.92	179.45	51529 - 55205	96	N
J1/59-2205	B1/56-22	0.460974	10.87	177.16	51529 - 53975	28	IN N
J1801 - 2154 J1801 - 2304	B1758-23	0.575297	112.93	387.90 1073.90	31216 - 55205 47911 - 55507	411	Y

表 3.1 续表

PSR J	PSR B	P (s)	$\dot{P}_{(10^{-15})}$	DM (cm ⁻³ pc)	数据时段 (MJD)	TOA数目	有跳变? (Y/N/P)
11001 0451	D1252 04	0.104004	107.01	000.00	40057 55507	0.01	37
J1801-2451	B1/5/-24	0.124924	127.91	289.00	4895/ 5550/	331	Y
J1803-2137	B1800-21	0.133667	134.36	233.99	50669 - 55530	182	Y
J1806-2125	-	0.481/89	121.40	750.40	51155 - 55206	74	P
J1809-1917	-	0.082747	25.54	197.10	50/82 - 55530	134	Y
J1812-1910	-	0.430991	37.74	892.00	51804 — 55206	41	N
J1814-1744	-	3.975905	744.70	792.00	51212 - 54505	50	Р
J1815 - 1738	-	0.198436	77.85	728.00	51157 - 55205	96	Ν
J1820 - 1529	-	0.333243	37.91	772.00	51244 - 55206	41	N
I1821 - 1419	_	1.656010	894 50	1123.00	51410 - 54505	53	N
I1824 - 1945	B1821-19	0 189335	5 23	224 65	51844 - 55206	99	N
J1024-1945	B1021-19	0.189555	5.25	224.00	51844 - 55200	33	1
J1825-0935	B1822-09	0.769006	52.50	19.38	51844 — 55073	85	Y
J1825-1446	B1822-14	0.279187	22.68	357.00	51844 - 55205	96	N
J1826-1334	B1823-13	0.101487	75.25	231.00	50749 — 55530	174	Y
J1828-1057	-	0.246328	20.70	245.00	51805 - 55206	70	Ν
J1828-1101	-	0.072052	14.81	607.40	51214 - 55206	42	Ν
J1830-1059	B1828-11	0.405043	60.03	161.50	51133 — 55206	212	Ν
J1831-0952	-	0.067267	8.32	247.00	51301 - 55206	77	Ν
J1832-0827	B1829-08	0.647293	63.88	300.87	51844 - 55206	80	Ν
J1833-0827	B1830-08	0.085284	9.17	411.00	50748 - 55206	132	Р
J1834 - 0731	_	0.512980	58.20	295.00	51632 - 55206	63	Ν
J1835-0643	B1832-06	0.305830	40.46	472.90	51529 - 55206	91	Ν
J1835-1106	-	0.165907	20.61	132.68	51945 — 55530	105	Y
J1837-0604	-	0.096294	45.17	462.00	51089 - 55206	91	Ν
J1838 - 0549	-	0.235303	33.43	274.00	51691 - 55206	49	Ν
J1839 - 0905	-	0.418969	26.03	348.00	51410 - 55206	60	N
J1841 - 0524	-	0.445749	233.72	289.00	52150 - 55507	134	Y
J1842 - 0905	-	0.344643	10.49	343.30	51460 - 55206	48	Ν
J1843 - 0355	-	0.132314	1.04	797.60	51159 - 55206	42	N
J1843 - 0702	-	0.191614	2.14	228.10	51692 - 55206	61	N
I1844 - 0256	_	0.272963		820.20	51559 - 55206	109	N
0200		0.272900		020.20	51555 55200	100	
J1844-0538	B1841 - 05	0.255699	9.71	412.80	51844 — 55206	75	Ν
J1845-0743	-	0.104695	0.37	281.00	51633 - 55206	50	Ν
J1847-0402	B1844 - 04	0.597769	51.71	141.98	51844 - 55206	75	Ν
J1853-0004	-	0.101436	5.57	438.20	51411 - 55206	37	Ν
$J1853 \pm 0011$	-	0.397882	33.54	568.80	51148 - 55183	26	N
11000 0011		5.5577002	00.04	000.00	21110 20100		.,

1 Y:本工作测到跳变; N:无跳变; P:有早于本工作数据时段的跳变记录



图 3.2 证认跳变事件的图示。上图: Vela脉冲星中发生于MJD ~53193.09的大幅度跳变。 计时解的相位连贯性被此跳变破坏。下图: PSR J1048-5832中发生于MJD ~53674.3的小幅 度跳变。计时解中的"尖"点指示出了这个跳变的发生。图中的垂直的虚线标记出跳变发 生的时间。

- 40 -



图 3.3 Vela脉冲星的脉冲频率和脉冲频率一阶导数的演化。图中显示出四个跳变事件,分别发生在MJD ~50369.394, ~51559.3190, ~53193.09和~53959.93。上子图显示脉冲频率 残差 $\Delta\nu$,这一项是通过减掉第一个前跳变解的脉冲频率和其一阶导数而得到的。中子图是 脉冲频率残差 $\Delta\nu$ 的扩展图,其中每一个间跳变和后跳变解的平均值均被减掉。下子图显示 脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 。跳变发生的时间由垂直的虚线所标记,虚线项端的数字标记出在我们 的数据时段中所测到的跳变的序列。

最终所得的位置参数将在后续的数据处理中保持固定。

脉冲星脉冲频率跳变事件被定义为脉冲频率的突然增加。这种频率的一小 跳在计时残差中有如下的表现。对于大一些的跳变,计时残差的相位连贯性将 会被破坏(比如,见,图3.2中的上图)。对于小幅度的跳变,计时残差中会 表现出一个"尖"点(比如,见,图3.2中的下图)。对于每一个显示出跳变 的脉冲星数据集,我们使用TEMPO2中的GLITCH插件去得到脉冲频率和其一阶 导数随时间的变化。具体来说,我们使用GLITCH插件对计时残差以连续的六 个TOA为一组进行局域拟合,求得一系列脉冲频率和脉冲频率一阶导数。典型 的六个TOA大约跨越二至六个月的时间。有时,在一个无跳变的区间,TOA的 数目少于六个。对于这种情况,我们只能使用可以利用的最多的TOA去分别得 到一个脉冲频率和一个脉冲频率一阶导数的测量。不过,这种情况是比较少 的。在图3.3中,作为一个例子,我们展示按照上述方法得到的Vela脉冲星的脉 冲频率和脉冲频率一阶导数的演化图。

在TEMPO2中,一个跳变事件如Edwards, Hobbs & Manchester(2006)中的式

(121)所描述[123]:

$$\phi_{\rm g} = \Delta \phi + \Delta \nu_{\rm p} (t - t_{\rm g}) + \frac{1}{2} \Delta \dot{\nu}_{\rm p} (t - t_{\rm g})^2 +$$

$$[1 - e^{-(t - t_{\rm g})/\tau_{\rm d}}] \Delta \nu_{\rm d} \tau_{\rm d},$$
(3.1)

其中跳变事件被描述为在相位,脉冲频率和脉冲频率一阶导数中均有长期增量 ($\Delta \phi$, $\Delta \nu_{\rm p}$, $\Delta \dot{\nu}_{\rm p}$ 分别表示),另附加一项瞬态项,该项在跳变发生时使脉 冲频率增加 $\Delta \nu_d$,此增量在跳变后在时标 τ_d 内指数衰减为零。初始的跳变发生 时间tg被定为前跳变的最后一个TOA和后跳变的第一个TOA的中值。初始的对 于 $\Delta \nu_{\rm p}$ 和 $\Delta \dot{\nu}_{\rm p}$ 的估计值来自GLITCH插件直接对于脉冲频率残差的拟合。对于跳 变参数的最终取得,我们通过将式(3.1)直接引入到TEMPO2对于计时残差的 拟合当中来获得。在我们的工作中,我们将式(3.1)中的Taylor展开式扩展至 包括 $\Delta n u_n$,用以衡量跳变引起的脉冲频率二阶导数 $\ddot{\nu}$ 的变化。在用TEMPO2拟 合时,我们以跳变发生的时间为中心向前向后取总时段在~ 200至~ 3000天 的数据。在拟合进行中,我们同时使用最大取到二阶的Taylor多项式, $\phi(t) =$ $\phi_0 + \nu t + \frac{1}{2}\dot{\nu}t^2 + \frac{1}{6}\dot{\nu}t^3$,来滤掉计时噪声中的低频成分。包括 τ_d 的拟合要复杂一 些。由于TEMPO2中实施的是线性的最小二乘法拟合,所以有必要使 τ_d 具有一个 比较好的初始估计值。这个估计值的取得,通过两个步骤来实现。第一步,通 过用眼观察后跳变的ib的变化来给定一个粗糙的ra值。第二步,在第一步中得 到的₇4将会被引入到拟合中,通过手动增加或减少₇4使得我们总可以找到某一 个 tau_d 值,这个值将使拟合后的计时残差具有最小的 χ^2 。这样得到的 τ_d 就作为 上述初始估计值而被作为拟合参数参与到后续的拟合中。这里注明一点,当在 拟合一个跳变时包括了指数恢复项,我们取后跳变的数据时段包括指数衰减的 时标。于是,在跳变发生时,脉冲频率的增加和脉冲频率一阶导数的变化可表 示为

$$\Delta \nu_{\rm g} = \Delta \nu_{\rm p} + \Delta \nu_{\rm d} \tag{3.2}$$

和

$$\Delta \dot{\nu}_{\rm g} = \Delta \dot{\nu}_{\rm p} - \frac{\Delta \nu_{\rm d}}{\tau_{\rm d}} \tag{3.3}$$

它们的误差可由标准的误差传播公式得到。另外,可以定义因子 $Q \equiv \frac{\Delta \nu_{d}}{\Delta \nu_{g}}$ 来描述指数恢复的程度。

对于每一个跳变,我们通过假设跳变发生前后脉冲相位连续来尝试将跳变 -42发生的准确时间解出。但是,只有当两个条件满足时,这一点才有可能实现。 一个条件是跳变幅度不能太大,一个条件是跳变前的最后一次观测与跳变后的 第一次观测的间隔不能太长。对于无法解出准确发生时间的跳变,我们首先查 阅文献,寻找是否已经有准确的跳变发生时间被公布。如果有,我们即采用文 献中提供的跳变发生时间。如果没有,我们将跳变发生时间 t_g 取为跳变前的最 后一次观测与跳变后的第一次观测的间隔的中间点,误差即取为观测间隔的一 半。跳变发生时间的不确定性,将影响跳变参数的误差。为了考虑这一点,我 们假设跳变参数线性依赖于跳变发生时。在此前提下,我们可以将跳变时间手 动调整到一个非常接近跳变发生后第一次观测的时间。这样,对每一个跳变参 数,就会得到一个新拟合值与原有拟合值之间的差。最终的误差取这个参数差 与原有误差之间的平方和的平方根。如果我们将取观测间隔中点的跳变发生时 记为 t_g^C ,而将取接近后跳变首次观测的跳变发生时记为 t_g^U ,那么对于某一个跳 变参数 ξ ($\xi = \Delta \nu_p, \Delta \nu_p, \Delta \nu_d, \tau_d$),其总误差 ϵ_t 为

$$\epsilon_{\rm t} = \sqrt{(\xi^{\rm U} - \xi^{\rm C})^2 + \epsilon_{\rm i}^2},\tag{3.4}$$

其中 ξ^{U} 和 ξ^{C} 表示当跳变发生时分别取 t_{g}^{U} 和 t_{g}^{C} 时的参数 ξ 的值, ϵ_{i} 为当跳变发生时 取 t_{g}^{C} 时参数 ξ 的误差。

3.4 结果

按照在§3.3中叙述的数据处理方法,我们对包含165颗脉冲星的Parkes计时数据库进行了处理。我们发现有129颗脉冲星并没有在我们的观测时段内表现出跳变现象,有36颗脉冲星表现出了跳变现象。在接下来的一个小节,我们首先展示129颗无跳变的脉冲星的后拟合计时残差。对于跳变的详细的结果公布,我们将在§3.4.2中进行。

3.4.1 129颗脉冲星的计时残差

图3.4中所示为129颗脉冲星的计时残差。本项工作所使用的数据库没有显示这些脉冲星中有过跳变现象。在拟合这些计时残差时,脉冲频率与脉冲频率一阶导数被作为了拟合参数。对于有些脉冲星,在早期的针对年轻脉冲星的观测项目与近期的Fermi观测项目之间有比较大的观测间隔。因此,我们将两部分数据分别示出。由于早期数据以模拟后端纪录,所以我们在脉冲星名称后的括

- 43 -



图 3.4 129颗脉冲星的后拟合计时残差。拟合参数为脉冲频率与脉冲频率一阶导数。脉冲 星名称后括号内的字符 "A"表示由模拟滤波器组纪录的数据,字符 "D"表示由数字滤波 器组纪录的数据。脉冲星名称下边的数字表示该星计时残差的峰-峰值,单位为脉冲星脉冲 周期。

- 44 -



图 3.4 续图



图 3.4 续图



图 3.4 续图



图 3.4 续图



图 3.4 续图



图 3.4 续图



图 3.4 续图



图 3.4 续图
PSR J	R. A. (h:m:s)	Dec. (° ′ ″)	位置纪元 (MJD)	μ_{α} (mas yr ⁻¹)	μ_{δ} (mas yr ⁻¹)	参考
10700 1440	07 00 16 45(0)	14 40 26 0(0)	51865.00			[10(]
J0729-1448	0/(29(10.45)(2))	-14:48:50.8(8)	51307.00	-	-	[120]
J0/42-2822	07:42:49.058(2)	-28:22:43.76(4)	49326.00	-29(2)	4(2)	[12/, 128]
J0834-4159	08:34:17.815(8)	-41:59:36.01(9)	52347.0	-	-	半 上作
J0835-4510	08:35:20.61149(2)	-45:10:34.8/51(3)	51544	-49.68(6)	29.9(1)	[129]
J0905-5127	09:05:51.94(5)	-51:27:54.0(4)	54072.0	-	-	本 上作
J1016-5857	10:16:21.16(1)	-58:57:12.1(1)	52717.00	-	-	[130]
J1048-5832	10:48:12.2(1)	-58:32:05.8(8)	50889.00	-	-	[99]
J1052-5954	10:52:38.11(7)	-59:54:44.1(5)	51683.00	-	-	[131]
J1105-6107	11:05:26.17(4)	-61:07:51.4(3)	50794.00	-	-	[99]
J1112-6103	11:12:14.81(4)	-61:03:31.1(6)	51055.00	-	-	[116]
J1119-6127	11:19:14.30(2)	-61:27:49.5(2)	52109.85	-	-	[132]
J1301-6305	13:01:45.76(14)	-63:05:33.9(12)	51206.00	-	-	[116]
J1341-6220	13:41:42.63(8)	-62:20:20.7(5)	50859.00	-	-	[99]
J1412-6145	14:12:07.69(5)	-61:45:28.8(6)	51186.00	-	-	[116]
J1413-6141	14:13:09.87(9)	-61:41:13(1)	51500.00	-	-	[131]
I1420-6048	14:20:08 237(16)	-60.48.1643(15)	51600.00	-	_	[133]
11452 - 6036	14:52:51 898(8)	-60.36.31.35(6)	51630.00	_	_	[131]
11453-6413	14.53.32684(8)	-64.13.1581(7)	52608.0	-16(1)	-21.3(8)	太工作
11531 - 5610	15.31.27.91(1)	-56:10:55.0(1)	51448.00	-	21.5(0)	[131]
11614 - 5048	16:14:11.29(3)	-50.48.03.5(5)	50853.00	_	_	[99]
01011 0010	1011 11122 (0)	2011010212(2)	00000.00			[22]
J1646-4346	16:46:50.8(3)	-43:45:48(8)	52792.0	-	-	本工作
J1702-4310	17:02:26.94(5)	-43:10:40(2)	51597.00	-	-	[131]
J1709-4429	17:09:42.728(2)	-44:29:08.24(6)	50042.00	-	-	[99]
J1718-3825	17:18:13.565(4)	-38:25:18.06(15)	51184.00	-	-	[116]
J1730-3350	17:30:32.28(6)	-33:50:28(4)	53826.0	-	-	本工作
11701 4744	17 21 42 17(7)	47 44 27(0)	54540.0			+
J1/31-4/44	1/:31:42.1/(/)	-47:44:37(2)	54548.0	-	-	半⊥11⊧
J1737-3137	17:37:04.29(4)	-31:37:21(3)	51234.00	-	-	[126]
J1740-3015	17:40:33.82(1)	-30:15:43.5(2)	54780.00	-	-	[128]
J1801-2304	18:01:19.829(9)	-23:04:44.2(2)	54000.00	-	-	[134]
J1801-2451	18:01:00.016(8)	-24:51:27.5(2)	53348.00	-11(9)	-1(15)	[135]
J1803-2137	18:03:51.4105(10)	-21:37:07.351(10)	51544	11.6(18)	14.8(23)	[136]
J1809-1917	18:09:43.132(6)	-19:17:40(1)	54632.0	-	-	本工作
J1825-0935	18:25:30.629(6)	-09:35:22.3(3)	53300	-13(11)	-9(5)	[94, 128]
J1826-1334	18:26:13.175(3)	-13:34:46.8(1)	52400	23.0(25)	-3.9(31)	[94, 51]
J1835-1106	18:35:18.41(7)	-11:06:15(4)	53882.0	27(46)	56(190)	本工作
J1841-0524	18:41:49.32(5)	-05:24:29.5(12)	52360.00	-	-	[130]

表 3.2 36颗跳变脉冲星的位置与自行参数。

号内用字符"A"标记。Fermi项目的数据由数字式后端纪录,在脉冲星名称后的括号内,我们用字符"D"标记。

3.4.2 36颗南天脉冲星中测到的107个跳变

在165颗脉冲星的样本中,我们发现有36颗存在跳变现象。在处理了这36颗

– 53 –

表 3.3 36颗跳变脉冲星的前/后跳变计时参数。

PSR J	(s^{-1})	$(10^{-12} \text{ s}^{-2})$	$(10^{-24} \text{ s}^{-3})$	参考纪元 (MJD)	数据时段 (MJD)	TOA 数目	Rms残差 (ms)	χ^2_r [d.o.f]
J0729-1448	3.97318845714(15) 3.9731688132(5) 2.07214824726(14)	-1.7840(4) -1.7824(4) 1.7821(2)	-	54263.0 54391.0	54218 — 54309 54333 — 54450	11 13	0.32	5.23[8] 34.0[10] 2.24[5]
	$\begin{array}{c} 3.97314824730(14) \\ 3.9731315102(3) \\ 3.9730918334(6) \end{array}$	-1.7821(2) -1.7837(4) -1.79905(8)	-	54634.0 55059.0	54483 - 54503 54597 - 54673 54690 - 55429		$0.21 \\ 0.17 \\ 13.2$	2.34[3] 3.41[1] 18000[46]
J0742-2822	5.9964098032(3) 5.99624713923(16)	-0.604567(3) -0.605276(8)	2.59(5) -29(3)	52188.0 55315.0	49364 — 55014 55051 — 55579	402 79	$32.5 \\ 0.97$	16900000[398] 26700[75]
J0834-4159	8.256502162607(19) 8.25645335747(3)	$\begin{array}{c} -0.2918552(9) \\ -0.2918531(12) \end{array}$	-	52347.0 54283.0	51299 — 53395 53423 — 55145		$1.00 \\ 0.887$	23.5[61] 27.9[53]
J0835-4510	$\begin{array}{c} 11.196712768(4)\\ 11.1954495935(6)\\ 11.1935358060(14)\\ 11.1919403172(6)\\ 11.1906270383(6) \end{array}$	-15.5997(2) -15.60896(3) -15.60146(3) -15.61563(6) -15.59475(3)	1326(33) 1077(3) 685(3) 1219(7) 739(3)	49985.0 50939.0 52384.0 53585.0 54580.0	49608 — 50364 50387 — 51493 51577 — 53191 53222 — 53948 53989 — 55172	$59 \\ 223 \\ 101 \\ 44 \\ 240$	$14.9 \\ 6.71 \\ 17.5 \\ 1.63 \\ 8.04$	47200[55] 17100[219] 64800[97] 780[40] 21500[236]
J0905-5127	$\begin{array}{c} 2.88776598305(12) \\ 2.88776198459(6) \end{array}$	$-0.20879(7) \\ -0.20845(3)$	-	49425.0 49649.0	49364 — 49488 49560 — 49739	$6\\9$	$0.25 \\ 0.26$	5.64[3] 2.36[6]
	2.88771636557(6) 2.88768278363(6)	$-0.2071686(11) \\ -0.2073986(12)$	-2.02(12) 0.38(7)	52195.0 54071.0	51526 — 52865 52998 — 55145	$21 \\ 65$	$0.95 \\ 3.70$	355[17] 2790[61]
J1016-5857	$\begin{array}{l} 9.3126315989(4)\\ 9.3115113267(6)\\ 9.3106478766(6)\end{array}$	-6.990896(13) -6.994765(11) -7.00431(5)	78(1) 122.4(5) 133(18)	51913.0 53791.0 55250.0	51299 — 52527 52571 — 55011 55072 — 55429	$97 \\ 134 \\ 19$	$3.28 \\ 15.3 \\ 0.78$	1830[93] 27700[130] 64.8[15]
J1048-5832	8.0873027360(12) 8.08699243910(13) 8.0865150443(16) 8.085529089(3) 8.0847483076(11)	$\begin{array}{c} -6.27372(4) \\ -6.27060(14) \\ -6.28276(4) \\ -6.27007(5) \\ -6.27386(5) \\ -6.20404(6) \end{array}$	76(5) 136(3) 169(4) 181(7)	48418.0 48991.0 49914.0 51743.0 53212.0	47910 — 48928 48957 — 49025 49043 — 50786 50792 — 52696 52771 — 53653	60 9 90 91 35	$10.6 \\ 0.09 \\ 24.0 \\ 48.0 \\ 6.29 \\ 5.25 \\ 6.25 \\ $	52500[56] 3.85[6] 1170000[86] 8580000[87] 96600[31]
J1052-5954	8.0842772585(18) 8.0838894263(12) 5.5372526159(4)	-6.26424(9) -6.28529(6) -0.61341(11)	98(12)	54843.0 54352.0	53080 - 54480 54505 - 55183 54220 - 54485	34 34 12	4.42 1.25	214000[30] 8.34[9]
	5.537221559(1)	-0.6179(1)	-	54982.0	54504 — 55460	42	25.7	1920[39]
J1105-6107	$\begin{array}{c} 15.8248209436(12)\\ 15.8245012491(16)\\ 15.823737653(2)\\ 15.8231268298(20)\\ 15.8230116650(6) \end{array}$	$\begin{array}{c} -3.95900(6) \\ -3.96232(4) \\ -3.96361(4) \\ -3.96587(13) \\ -3.96652(9) \end{array}$	-108(8) 38(6) 13(2) -11(30) 319(81)	49995.0 50942.0 53217.0 55002.0 55382.0	$\begin{array}{r} 49589 - 50402 \\ 50434 - 51451 \\ 51744 - 54690 \\ 54733 - 55272 \\ 55304 - 55461 \end{array}$	41 108 99 38 11	2.54 6.19 28.0 3.38 0.13	2590[37] 17400[104] 661000[95] 13200[34] 35.9[7]
J1112-6103	$\begin{array}{c} 15.3936495872(5)\\ 15.3927981288(7)\\ 15.3916094863(18)\end{array}$	-7.45479(4) -7.471152(13) -7.47676(3)	-24(11) 222(1) 242(3)	51055.0 52417.0 54286.0	50850 — 51261 51529 — 53307 53367 — 55207	50 58 70	$0.67 \\ 5.26 \\ 15.1$	6.61[46] 904[54] 6410[66]
J1119-6127	$\begin{array}{c} 2.45326884390(8)\\ 2.4507184171(3)\\ 2.447759374(7)\\ 2.445356612(16)\end{array}$	$\begin{array}{c} -24.211160(7) \\ -24.142246(5) \\ -24.0581(3) \\ -23.9863(5) \end{array}$	700(2) 626.2(4) 1045(33) 1585(43)	51121.0 52342.0 53763.0 54921.0	50852 — 51392 51405 — 53279 53306 — 54220 54268 — 55576	$57 \\ 149 \\ 49 \\ 93$	$1.08 \\ 21.04 \\ 86.0 \\ 762$	7.46[53] 3800[145] 69100[45] 1940000[89]
J1301-6305	5.4190840865(3) 5.418270453(1) 5.417207268(1)	-7.82942(1) -7.84262(3) -7.833490(18)	248(2) 282(2) 276(2)	51420.0 52658.0 54249.0	50941 — 51901 51946 — 53371 53395 — 55104		$3.61 \\ 17.0 \\ 20.2$	17.1[58] 421[47] 580[60]
J1341-6220	5.1728688502(4) 5.17263893435(17) 5.1724951732(7) 5.1723882419(4) 5.1722099750(5) 5.1719833589(3) 5.1716336852(6) 5.1714729568(9) 5.171283363(4) 5.170994398(12) 5.1708906160(7) 5.170541851(19) 5.170541851(19) 5.170542517491(3) 5.170342469(7) 5.169582906(3)	$\begin{array}{c} -6.76072(4)\\ -6.77137(3)\\ -6.76951(12)\\ -6.76992(5)\\ -6.76992(5)\\ -6.76796(4)\\ -6.76774(8)\\ -6.77725(9)\\ -6.7866(3)\\ -6.7866(3)\\ -6.7844(3)\\ -6.7618(8)\\ -6.7618(8)\\ -6.76114(4)\\ -6.76214(7)\\ -6.7592(4) \end{array}$	$\begin{array}{c} 645(9)\\ 167(9)\\ 356(93)\\ 484(74)\\ 87(11)\\ 308(13)\\ -63(36)\\ -2120(269)\\ -177(181)\\ 365(14)\\ 287(22)\\ 3044(251)\end{array}$	49766.0 50174.0 50603.0 50914.0 51303.0 51911.0 52190.0 53518.0 53013.0 53347.0 53347.0 53799.0 54297.0 54672.0	$\begin{array}{r} 49540 49992\\ 50026 50322\\ 50341 50501\\ 50596 51133\\ 51155 51451\\ 51782 52041\\ 52145 52235\\ 52266 52771\\ 52804 53222\\ 53241 53425\\ 53488 54112\\ 54144 54451\\ 54486 54860\\ 54881 55072\\ \end{array}$	$ \begin{array}{r} 16 \\ 16 \\ 13 \\ 17 \\ 48 \\ 8 \\ 16 \\ 4 \\ 17 \\ 15 \\ 9 \\ 19 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 10 \\ \end{array} $	$\begin{array}{c} 1.05\\ 0.36\\ 0.42\\ 0.31\\ 1.89\\ 0.41\\ 0.93\\ 0.48\\ 11.8\\ 32.0\\ 2.01\\ 71.7\\ 0.58\\ 1.71\\ 1.90 \end{array}$	23.1[12] 4.75[12] 9.74[9] 8.02[13] 265[44] 10.9[4] 68.5[12] 57.6[1] 11700[13] 188000[11] 640[6] 26.4[11] 189[11] 189[11] 362[6]
	5.169858206(3) 5.16968689489(14)	-6.7592(4) -6.764590(16)	3044(251) 109(5)	54976.0 55282.0	54881 - 55072 55104 - 55461	10 20	1.90 0.45	362[6] 13.5[16]

- 54 -

PSR J	(s^{-1})	$(10^{-12} \text{ s}^{-2})$	$(10^{-24} \text{ s}^{-3})$	参考纪元 (MJD)	数据时段 (MJD)	TOA 数目	Rms残差 (ms)	χ^2_r [d.o.f]
J1412-6145	3.17232313958(4) 3.1721466685(3)	-0.9928240(13) -0.997048(3)	3.80(17) 7.00(9)	51353.0 53669.0	50850 — 51858 51879 — 55461	$45 \\ 114$	$0.79 \\ 28.1$	2.59[41] 4270[110]
J1413—6141	$\begin{array}{c} 3.5012521433(5)\\ 3.5011397601(19)\\ 3.50105387384(14)\\ 3.5009433012(4)\\ 3.5007434868(4)\\ 3.5005683237(18)\\ 3.5003276299(11)\\ 3.4999222810(7) \end{array}$	$\begin{array}{c} -4.08114(8)\\ -4.0842(8)\\ -4.08410(5)\\ -4.08332(7)\\ -4.08338(9(14)\\ -4.0871(3)\\ -4.08149(4)\\ -4.077751(19)\end{array}$	-350(40) 107(3) -1648(218) 53(4) 33(2)	51055.0 51374.0 51627.0 51941.0 52515.0 53012.0 53708.0 54882.0	50850 - 51261 51294 - 51454 51472 - 51782 51844 - 52039 52145 - 52886 52925 - 53101 53150 - 54268 54303 - 55461	$26 \\ 9 \\ 24 \\ 16 \\ 27 \\ 6 \\ 36 \\ 54$	$7.20 \\ 5.52 \\ 0.90 \\ 0.79 \\ 3.05 \\ 1.61 \\ 17.5 \\ 14.0$	36.7[23] 21.8[6] 3.02[21] 3.21[12] 60.9[23] 35.9[2] 1470[32] 630[50]
J1420-6048	$\begin{array}{c} 14.6675125451(3)\\ 14.666147261(2)\\ 14.6645795787(12)\\ 14.6631475381(9)\\ 14.6618531329(16)\\ 14.6612348736(20) \end{array}$	$\begin{array}{c} -17.83946(3)\\ -17.83559(11)\\ -17.86112(6)\\ -17.85577(3)\\ -17.84922(8)\\ -17.90(12)\end{array}$	651(7) 964(12) 599(7) 945(5) 1552(14)	51311.0 52207.0 53243.0 54183.0 55031.0 55445.0	$\begin{array}{c} 51100 - 51523\\ 51678 - 52737\\ 52771 - 53716\\ 53734 - 54633\\ 54672 - 55391\\ 55429 - 55461\end{array}$	$26 \\ 80 \\ 77 \\ 38 \\ 46 \\ 5$	$\begin{array}{c} 0.37 \\ 13.9 \\ 6.43 \\ 2.20 \\ 4.95 \\ 0.15 \end{array}$	15.5[22] 17000[76] 3690[73] 599[34] 2.91[42] 4.40[2]
J1452-6036	$\begin{array}{c} 6.451956870952(9) \\ 6.451953766111(19) \end{array}$	-0.060343(1) -0.060447(5)	-	54635.0 55266.0	54220 — 55051 55072 — 55461	$35 \\ 17$	$\begin{array}{c} 0.16 \\ 0.12 \end{array}$	52.2[32] 33.4[14]
J1453-6413	$\begin{array}{c} 5.571461007545(8) \\ 5.571444247574(7) \end{array}$	$\begin{array}{c} -0.08520253(5) \\ -0.0852032(9) \end{array}$	0.0659(19)	52608.0 54885.0	50669 — 54548 54566 — 55206	$\begin{array}{c} 117\\ 28 \end{array}$	$0.29 \\ 0.09$	643[113] 237[25]
J1531-5610	$\begin{array}{c} 11.87624700867(4) \\ 11.8759122954(11) \end{array}$	-1.938066(6) -1.947567(11)	22.0(4)	51448.0 53621.0	51215 — 51680 51782 — 55461	31 130	$0.15 \\ 38.7$	4.98[28] 331000[126]
J1614-5048	$\begin{array}{c} 4.31760554(1)\\ 4.316214218(3)\\ 4.314824505(11)\\ 4.313373849(7)\end{array}$	$\begin{array}{c} -9.1754(2) \\ -9.22347(7) \\ -9.1601(3) \\ -9.17841(7) \end{array}$	366(13) 118(5) 366(32) -48(5)	48848.0 50635.0 52385.0 54248.0	47910 — 49784 49819 — 51451 51782 — 52989 53036 — 55461	$100 \\ 171 \\ 43 \\ 100$	447 95.5 159 282	2740000[96] 632000[167] 3800000[39] 4330000[96]
J1646-4346	$\begin{array}{c} 4.3173283630(18) \\ 4.3166537681(7) \end{array}$	-2.095392(11) -2.091929(20)	32.8(3) 109(2)	50857.0 54610.0	47913 — 53803 53949 — 55273	$258 \\ 47$	$294 \\ 13.1$	1080000[254] 718[43]
J1702-4310	$\begin{array}{c} 4.15729055112(16) \\ 4.1565459054(7) \end{array}$	$-3.864815(4) \\ -3.869325(18)$	40.25(14) 68(2)	52498.0 54786.0	51223 — 53774 54112 — 55461	$ 76 \\ 49 $	$7.49 \\ 13.4$	1100[72] 1550[45]
J1709-4429	$\begin{array}{l} 9.76127199222(13)\\ 9.7599091027(9)\\ 9.758422208(3)\\ 9.7571959786(15)\\ 9.7561600146(18)\end{array}$	$\begin{array}{c} -8.863764(4)\\ -8.856175(12)\\ -8.8516(1)\\ -8.85730(3)\\ -8.86627(8)\end{array}$	123.9(8) 185.7(6) 595(11) 223(2) 397(13)	48327.0 50132.0 52091.0 53730.0 55119.0	$\begin{array}{r} 47910 - 48746 \\ 48813 - 51451 \\ 51524 - 52659 \\ 52772 - 54689 \\ 54732 - 55507 \end{array}$	$46 \\ 197 \\ 36 \\ 78 \\ 38$	$0.56 \\ 27.4 \\ 17.1 \\ 22.6 \\ 8.42$	487[42] 911000[193] 1280000[32] 1880000[74] 157000[34]
J1718-3825	$\begin{array}{c} 13.39192401122(9) \\ 13.39144806554(9) \end{array}$	-2.3679369(7) -2.362796(5)	25.38(3) 16(2)	52890.0 55219.0	50878 — 54903 54931 — 55507	$\substack{146\\18}$	$2.85 \\ 0.14$	1500[142] 7.09[14]
J1730-3350	7.170087711(1) 7.1691594382(12)	-4.35574(2) -4.362960(14)	85(2) 56.8(6)	51303.0 53826.0	50539 — 52069 52145 — 55507	$\begin{array}{c} 69\\113\end{array}$	$11.5 \\ 58.6$	35900[65] 651000[109]
J1731-4744	$\begin{array}{c} 1.20511216181(5)\\ 1.20508590680(7)\\ 1.20505448010(3)\\ 1.20502531605(4)\\ 1.204993924876(15)\end{array}$	$\begin{array}{c} -0.2382630(12)\\ -0.2376693(20)\\ -0.2375479(7)\\ -0.2376213(13)\\ -0.2374356(6)\end{array}$	18.89(12) 1.95(18) 1.40(4) 3.68(16)	48773.0 50059.0 51590.0 53018.0 54548.0	$\begin{array}{r} 48184 - 49363 \\ 49415 - 50703 \\ 50722 - 52458 \\ 52484 - 53554 \\ 53589 - 55507 \end{array}$	$21 \\ 41 \\ 60 \\ 36 \\ 64$	$0.41 \\ 3.04 \\ 1.53 \\ 1.61 \\ 1.96$	8.58[17] 6460[37] 2230[56] 706[32] 23500[61]
J1737-3137	2.21990926991(9) 2.21987416781(9)	-0.68317(5) -0.684329(8)	-	54286.0 54930.0	54221 — 54351 54353 — 55507	$\begin{array}{c} 10 \\ 49 \end{array}$	$ \begin{array}{c} 0.33 \\ 8.16 \end{array} $	0.75[7] 141[46]
J1740-3015	$\begin{array}{c} 1.648184042812(13)\\ 1.64809155129(19)\\ 1.6479812921(9)\\ 1.64786917225(7)\\ 1.64774895802(16)\\ 1.647769409872(4)\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} -1.265524(4)\\ -1.266547(13)\\ -1.26564(5)\\ -1.266266(2)\\ -1.264817(7)\\ -1.266147(5)\end{array}$	125(98) 13.49(18) 11(2) 70(3)	50798.0 51665.0 52675.0 53728.0 54828.0 55370.0	$\begin{array}{r} 50669 - 50927 \\ 50987 - 52344 \\ 52361 - 52989 \\ 53036 - 54420 \\ 54450 - 55206 \\ 55234 - 55507 \end{array}$	42 27 19 48 37 17	$\begin{array}{c} 0.26 \\ 19.8 \\ 13.0 \\ 2.16 \\ 3.65 \\ 0.24 \end{array}$	82.3[39] 399000[24] 179000[15] 26600[44] 134000[33] 625[13]
J1801-2304	$\begin{array}{l} 2.4051703923(3)\\ 2.405172164856(9)\\ 2.40507528156(11)\\ 2.4050548970(3)\\ 2.40502945211(8)\\ 2.4049822461(6)\\ 2.40491876991(6)\\ 2.40482774696(6)\\ 2.40476474326(9)\end{array}$	$\begin{array}{c} -0.65365(4)\\ -0.653541(3)\\ -0.65348(5)\\ -0.65348(5)\\ -0.653426(7)\\ -0.653426(7)\\ -0.653179(5)\\ -0.653179(5)\\ -0.653049(1)\\ -0.65292(5)\end{array}$	2.8(3) 29(19) 40(2) 12(3) 2.44(7)	48176.0 49054.0 49878.0 50240.0 50694.0 51531.0 52684.0 54318.0 55435.0	$\begin{array}{r} 47911\!\!\!- 48442 \\ 48465\!\!\!- 49643 \\ 49730\!\!\!- 50026 \\ 50117\!\!\!- 50363 \\ 50462\!\!\!- 50927 \\ 51021\!\!\!- 52041 \\ 52145\!\!\!- 53223 \\ 53307\!\!\!- 55330 \\ 55364\!\!\!- 55507 \end{array}$	$16 \\ 61 \\ 11 \\ 25 \\ 83 \\ 20 \\ 17 \\ 73 \\ 5$	3.19 3.26 0.93 1.19 1.32 7.93 2.22 3.72 0.22	23.0[13] 21.5[57] 5.07[8] 7.83[21] 8.79[79] 464[16] 45.8[14] 37.5[69] 0.24[2]

表 3.3 续表

		-		-				
PSR J	(s^{-1})	$(10^{-12} \text{ s}^{-2})$	$(10^{-24} \text{ s}^{-3})$	参考纪元 (MJD)	数据时段 (MJD)	TOA 数目	Rms残差 (ms)	χ^2_r [d.o.f]
J1801-2451	$\begin{array}{c} 8.0071549008(15)\\ 8.006538717(1)\\ 8.005640187(4)\\ 8.004835195(4)\\ 8.0039126298(19)\\ 0.0095560298(2)\end{array}$	-8.17840(11) -8.19043(3) -8.18049(8) -8.19614(13) -8.17244(5)	369(32) 387(3) 505(9) 365(19) 146(4)	49171.0 50064.0 51348.0 52529.0 53834.0	48957 — 49386 49482 — 50646 50656 — 52041 52069 — 52990 53036 — 54633	17 81 97 32 58	$2.71 \\ 8.59 \\ 41.5 \\ 20.7 \\ 26.5 \\ 200 \\ 26.5 \\ 200 $	1020[13] 8550[77] 234000[93] 71900[28] 73400[54]
J1803-2137	$\begin{array}{c} 8.0030506682(6)\\ \hline\\ 7.48329875057(11)\\ \hline\\ 7.4824185508(11)\\ \hline\\ 7.480876011(3)\end{array}$	-8.19273(3) -7.48842(10) -7.50199(1) -7.50784(4)	297(4) 265.7(6) 251(3)	50709.0 52101.0 54526.0	54671 — 55507 50669 — 50750 50779 — 53423 53524 — 55530	46 16 96 70	0.12 27.2 45.4	928[42] 9.17[13] 427000[92] 696000[66]
J1809-1917	$\begin{array}{c} 12.08488375958(18) \\ 12.0841325570(8) \end{array}$	-3.727797(2) -3.730742(11)	37.74(12) 42.1(7)	52012.0 54404.0	50782 — 53242 53279 — 55530	57 77	$1.99 \\ 9.95$	365[53] 5960[73]
J1825-0935	$\begin{array}{c} 1.3003898596(5) \\ 1.30037753992(5) \end{array}$	$-0.088534(7) \\ -0.0888195(16)$	-1.4(5) 3.60(18)	52978.0 54608.0	51844 — 54112 54144 — 55073	$69 \\ 16$	$\substack{46.3\\0.32}$	578000[65] 485[12]
J1826-1334	9.8548791982(16) 9.85391251222(15) 9.8532263358(19)	-7.277563(15) -7.264712(11) -7.29885(5)	126(1) 69(4) 153(3)	51967.0 53506.0 54650.0	50749 — 53187 53279 — 53734 53770 — 55530	86 17 71	$24.9 \\ 0.21 \\ 28.2$	180000[82] 23.4[13] 107000[67]
J1835-1106	$\begin{array}{c} 6.02730411248(17) \\ 6.0271868732(8) \end{array}$	$-0.74791(6) \\ -0.74881(1)$	8.7(4)	52068.0 53882.0	51945 — 52191 52234 — 55530	9 96	$0.47 \\ 39.5$	395[6] 1210000[92]
J1841-0524	$\begin{array}{c} 2.243267777344(15)\\ 2.24322183389(19)\\ 2.24314896191(9)\end{array}$	$\begin{array}{c} -1.175696(4) \\ -1.175543(14) \\ -1.175947(3) \end{array}$	8(4) 11.4(37)	53813.0 54266.0 55006.0	53619 — 54008 54048 — 54485 54506 — 55507	8 18 37	$0.19 \\ 1.34 \\ 1.96$	0.09[5] 2.06[14] 4.40[33]

表 3.3 续表

脉冲星的数据之后,我们一共证认了107个跳变。通过与ATNF Pulsar Catalogue glitch table比较,我们发现有46个为新的发现。在指数恢复方面,我们为27个 跳变证认出这种恢复过程。另外,在与ATNF Pulsar Catalogue glitch table比较之后,我们发现有22个跳变为以前报告过的,但是并没有能够由我们的数据再次测出。主要的原因是我们的观测间隔往往比较长致使观测采样不够充分,从而 小幅度的跳变(比如,比例尺度~10⁻⁹)常常很难测出。由于同样的原因,我 们测出的指数恢复的时标往往为几十至几百天,任何短时标的指数恢复可能已 经被错过了。在长期的衰减方面,我们在多数颗脉冲星中见到了明显的线性恢 复结构,并且为13个跳变拟合了Δΰ_p项。

表3.2示出了36颗跳变脉冲星的位置参数和自行参数。有28颗星的位置参数 来自ATNF Pulsar Catalogue。根据§3.3中所描述的方法,我们进一步为8颗脉冲 星拟合了位置参数。所有的自行参数均来自ATNF Pulsar Catalogue。表3.3列出 了跳变脉冲星的前,间和后跳变的计时解。此表中包含脉冲星在J2000系统下的 名称,ν, ν, ν, ö, 参考纪元,拟合的数据时段,TOA数目,后拟合方均根计时 残差和约化χ²。值得注意的是,由于一些脉冲星存在很显著的计时噪声,在拟 合中可能会在多处手动加入附加相位,这会导致比较大的方均根残差。对于这 样的情况,计时解只适用于所拟合的数据段,而不可用于向外推算。表格3.4给 出的是跳变参数。第二列给出跳变的序列号,相应的跳变发生纪元在第三列中

- 56 -

示出。对于每一个跳变,第四列指出这个跳变是否为新的发现,字符"N"表示是新的发现,字符"P"表示非新的发现。对于每一个跳变参数,有两个误差被给出。第一对括号中给出的是TEMPO21σ误差,如果考虑了跳变纪元不确定性的误差与标准的TEMPO2给出的误差不同,那么则在第二对括号中给出。这里著名误差均相对于参数的最后一位数字给出。表中的第11,12,13和14列分别示出TOA数目,数据时段,后拟合方均根残差和约化χ²。

接下来,我们将详细介绍每一个跳变脉冲星,报告在其中测到的跳变事件。对不同的跳变,我们引用它们的序号。读者可以根据序号,在表3.4中找到 对应的跳变发生纪元。在图3.5中,我们示出由我们的观测所测量的36颗跳变脉 冲星的脉冲频率与脉冲频率一阶导数的演化。

- **PSR J0729–1448** 在我们的3年的数据时段中,我们测到了4次跳变。前 三次跳变比较小 ($\Delta\nu_g/\nu \sim 10^{-8}$),而第四次跳变明显的比较大 ($\Delta\nu_g/\nu \sim 6 \times 10^{-6}$)。对这四个跳变,以前已经有所报道 [118,95]。 事实上,Parkes的数据不够充分,对于前三个小跳变的证认,我们参 考了Espinoza et al. (2011)的工作 [95]。由于同样的原因,我们不能够 量化 ν 的长期变化。Weltevrede et al. (2010)报告第四个大跳变的发生 时间为MJD 54711(21) [118]。我们的分析给出了一个更为准确的时间 为MJD 54681(9),这个时间与Espinoza et al. (2011)给出的MJD 54687(3)相 一致 [95]。
- PSR J0742-2822 (PSR B0740-28) 对于这颗跳变脉冲星,总共有七次跳变已 经被报道 [137,138,95]。我们对于这颗星有17年的数据。在我们的数据中没有发现新的跳变事件。跳变1可以被很清楚的见到,但是由于 观测采样不充分的原因,我们无法测到我们的数据所包含的前四个跳 变事件。对于跳变1,Espinoza et al. (2011)给出Δν/ν ~ -0.372,相应 于Δν ~ 225 × 10⁻¹⁵ s⁻² [95]。我们的测量给出Δν ~ -1 × 10⁻¹⁵ s⁻²,在我 们的测量中ν显示出明显的噪声。
- PSR J0834-4159 这颗脉冲星并没有在以前有过关于它的跳变事件的报告。在 我们的这项工作中,我们证认了一个小幅度的跳变。我们的观测一共涵盖 了关于这颗脉冲星的脉冲频率和脉冲频率变化率一阶导数的10年的演化。 我们发现在脉冲频率的残差Δυ和脉冲频率一阶导数边中这颗脉冲星表现出 明显的噪声。并且,脉冲频率一阶导数边在跳变事件之后,相对于跳变发 生之前表现出一点长期的变化。我们的观测数据当中,并没有显示出后跳

– 57 –

变的指数恢复的情况。

PSR J0835-4510 (PSR B0833-45) 这颗Vela脉冲星总共在~38年中被观测到 发生过16次跳变(如果读者想查阅Vela 脉冲星的全部的跳变时间的报告,请参阅Jodrell Bank Glitch Catalogue或者是ATNF Pulsar Catalogue glitch table)。在全部的这16次跳变事件中,有13次跳变事件的比例尺度大于10⁻⁶。在我们的使用Parkes望远镜的对于这颗星的观测中,我们可以 描绘Vela脉冲星的脉冲频率和脉冲频率一阶导数的总共~15年的演化。我们的数据中一共显示了4个跳变事件,这些事件在以前已经有所报道 [139,99,140,101,141,142]。这4个跳变事件的幅度都比较大,比例尺度Δν_g/ν > 2 × 10⁻⁶。这4个跳变事件当中的每一个都展示出后跳变的指数恢复和线性恢复。我们的测量显示脉冲频率二阶导数在任何一次跳变事件之后都有很大的变化。在分析数据时,我们尝试拟合指数恢复和线性恢复。但是,除去跳变3,我们不能够为其它的跳变拟合出脉冲频率二阶导数的长期变化项Δΰ_p。这可能是由于在计时残差中存在的噪声引起的。接下来,我们详细叙述这4次跳变事件。

对于跳变1,Wang et al. (2000)报告了一个指数恢复,时间常数为~ 916天。但是,后跳变的脉冲频率一阶导数i的演化显示,指数恢复 在200天左右结束,后续的衰减较可能为线性恢复。对于计时残差的 拟和表明这个指数衰减的时标为~185天,恢复比例Q为大约0.03。跳 变2曾经被一项高时间分辨率的计时观测项目所捕捉到 [101]。四个短 时标的指数恢复被观测到。其中,最短的一个只有大约1.2分钟。不 过,Parkes数据不够充分,不足以分辨出这些短时标的指数恢复。但是, 我们的数据明显表明了一个时标大约为100天的指数衰减的存在。拟和给 出 $Q \sim 0.02$, $\tau_d \sim 125$ 天。跳变3同样表现出了后跳变的指数恢复结构,并 且这个指数恢复可由 $Q \sim 0.009$ 和 $\tau_d \sim 37$ 天来标度。最近观测到的跳变4也 表现出一个指数恢复的结构。我们的拟和显示衰减比例为 $Q \sim 0.0119$,时 标为 $\tau_d \sim 73$ 天。

从Vela脉冲星的这四次跳变可以看出,后跳变行为被脉冲频率一阶 导数*i*的线性恢复所主导。这样的线性恢复叠加在时标较短的指数恢复 结构上,并且一直保持到下一次跳变的发生。线性恢复由脉冲频率二阶 导数*i*所表征。从表3.3中可以看出Vela脉冲星的*i*较大,并且在跳变发生 后*i*的变化也比较大。通过拟和计时残差得出Δ*i*_p(拟和中连同所有其它 跳变参数)往往比较困难。因为,对于跳变参数的拟和常常涉及局部拟

- 58 -

和,也就是说拟和时的数据段比较短。这就使得完整的线性恢复并没有被包括在内。而且,拟和时还会有计时噪声的影响。这就很可能导致拟和值与前/后跳变的 $\ddot{\nu}$ 的差不一致。在我们的分析中,跳变3表现为一个例子。 拟和给出 $\Delta \ddot{\nu}_{\rm p} = 304(23) \times 10^{-24} \, {\rm s}^{-3}$,而表3.3给出前/后跳变的 $\ddot{\nu}$ 的变化量为491(7) × 10⁻²⁴ ${\rm s}^{-3}$ 。

- PSR J0905-5127 这颗脉冲星是在Parkes南天脉冲星巡天项目中被发现的 [143]。目前还没有对于这颗星的跳变事件的报告。Parkes数据的总时段达 到大约16年,不过,其间存在一个长达~4年的间隙。我们对于Parkes数 据的分析结果显示这颗星曾经经历过两次跳变。这两个跳变都比较小, 比例尺度为~10⁻⁸。对于跳变1,我们的观测数据并不足以分析后跳变行 为。对于跳变2,我们没有观测到明显的后跳变的恢复过程。
- **PSR J1016**–**5857** 这颗周期为107 ms的脉冲星可能与超新星遗迹G284.3–1.8成 协 [144]。对于这颗星Parkes的计时观测已经达到大约11年。两个跳变被观测到。这两次事件很相似,相对尺度均大约为~ 2×10⁻⁶,并且脉冲频率 一阶导数的相对变化Δ*i*_g/*i*都大约为4×10⁻³。对于跳变1,在*i*中表现出 的前与后跳变的斜率不同表明伴随着跳变的发生有一个脉冲频率二阶导数 的长期变化量。拟和给出Δ*ü*_p~70×10⁻²⁴ s⁻³,大致与表3.3给出的前/后 跳变的*i*的差值相一致。对于跳变2,我们的观测并没有表现出后跳变的恢 复行为。
- PSR J1048-5832 (PSR B1046-58) 这颗脉冲星是在针对银道面的20 cm巡天项 目中被发现的 [145]。随后的计时观测持续的在Parkes展开,到目前为 止,已经长达大约20年。Wang et al. (2000)和Urama (2002)已经公布了跳 变1,2,3的细节 [99,146]。Weltevrede et al. (2010)发现了跳变6 [118]。在 这里,我们报告新发现的跳变4和5。跳变4比较大,相对尺度为Δν_g/ν ~ 1.8×10⁻⁶。跳变5要小很多,相对尺度只有Δν_g/ν ~ 2.5×10⁻⁸。对于这两 次事件,在我们的观测中并没有表现出有后跳变的指数恢复的结构。

对于跳变2和3, Wang et al. (2000)将指数恢复项包括进去来拟和后跳 变行为,时间常数被分别假定为100天和400天 [99]。Urama (2002)层在高 时间分辨率的观测项目中检测到跳变3,捕捉到了两个后跳变的指数衰 减,时间常数分别为~32天和~130天。我们对于脉冲频率一阶导数*i*的测 量显示出这一项表现出明显的噪声。对于跳变2,我们的拟和显示后跳变 的指数恢复可以由*Q*~0.026和_{7d}~160天来表征。在这里需要注明,对于 这个跳变,由于只存在一次前跳变的*v*测量,所以我们无法衡量*v*的长期变化。对于跳变3,我们的拟和显示Q~0.008且_{7d}~60天。表3.3指示出,除了跳变2,脉冲频率二阶导数*v*非常显著,并且表现出在每次跳变之后都有比较明显的变化。平均来看,PSR J1048-5832的*v*以及其变化比Vela脉冲星的要小大约一个量级。

- PSR J1052-5954 对于这颗脉冲星的数据存在一个长约6年的间隙。图3.5中 所呈现的是在这个间隙之后的脉冲频率与脉冲频率一阶导数的演 化。Weltevrede et al. (2010)首先报告了发生在MJD ~ 54495的跳变事 件 [118]。后跳变的数据表明了一个指数衰减的存在,并且一个长期 的自转减慢率|*i*|的线性减少也同样存在。对于指数恢复的拟和表明,大 约0.067的跳变在~ 46天内恢复。
- **PSR J1105-6107** 这颗63 ms的脉冲星靠近超新星遗迹G290.1-0.8,且在伽玛射 线源2EG J1103-6106的误差圈内 [147]。目前,这个源已经被证认为伽玛 射线源2FGL J1105.6-6114 [148]。以前对于这颗脉冲星有过3次跳变事件 的报告 [99,118]。

在图3.5中,我们示出这颗脉冲星的脉冲频率与脉冲频率一阶导数~16年以来的演化。我们确认以前对于跳变1和3的报告 [99,118]。Wang et al. (2000)曾经报告了一个小跳变,发生在MJD~50610 [99]。但是,我 们发现在这个时间附近的计时行为更有可能为计时噪声所主导。图3.5中 显示的跳变4和5为新发现的跳变事件。后跳变的计时行为表现出比较强的 噪声,没有明显的指数恢复的结构。但是,在跳变1,2和3之后,计时行 为表现出脉冲频率一阶导数*i*的持续的增加。对于跳变4,目前的观测尚不 足以分析其后跳变的计时行为。

- **PSR J1112–6103** 自从在Parkes多波束巡天项目中发现这颗脉冲星 [116],这个源已经在Parkes被观测了大约12年的时间。如图3.5所示,两个跳变事件被观测到。这两个跳变都比较大,相对尺度为 $\Delta \nu_{\rm g}/\nu \sim 10^{-6}$ 。对于跳变1的后跳变行为,观测到的脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 的变化表明了脉冲频率二阶导数 $\ddot{\nu}$ 有一个明显的变化。拟和给出 $\Delta \ddot{\nu}_{\rm p} \sim 240 \times 10^{-24} \, {\rm s}^{-3}$ 。没有短期的指数衰减被观测到。对于跳变2,一个长期的指数衰减被观测到,可以由 $Q \sim 0.022$ 和 $\tau_{\rm d} \sim 300$ 天来表征。
- **PSR J1119-6127** PSR J1119-6127是一颗年轻脉冲星,与超新星遗迹G292.2-0.5成协[149]。图3.5给出了这颗脉冲星的脉冲频率与其一阶

导数从1998年2月到2011年1月的演化。在这段时间当中,3次跳变被观测到。跳变1比较小,相对尺度为 $\Delta \nu_{\rm g}/\nu \sim 4 \times 10^{-9}$ 。这个事件首先被Camilo et al. (2000)报告 [132]。跳变2和3都比较大,并且有明显的指数和线性恢复的特征。对于这两个事件,Weltevrede et al. (2011)已经给出了详尽的分析 [150]。我们的结果与那里的相一致。

- **PSR J1301-6305** 图3.5给出了这颗脉冲星从发现以来的11年里的脉冲频率ν与脉冲频率一阶导数ν的演化情况。如图所示,我们观测到了两次较大的跳变事件。跳变1具有比例尺度Δνg/ν ~ 4.6 × 10⁻⁶,而跳变2的尺度大约为这个值的一半。对于跳变1,一个指数衰减被观测到。拟和指出这个指数衰减可以由Q ~ 0.0049和τ_d ~ 58天来表征。正像在图3.5所见到的,对于这两次跳变,这颗脉冲星均表现出明显的线性恢复特征。表3.3给出由两次跳变分开的三段间隔的脉冲频率二阶导数ν均约为250 × 10⁻²⁴ s⁻³。我们发现由于计时噪声的影响,我们不能够拟和出Δν_p。
- PSR J1341-6220 (PSR B1338-62) 这颗脉冲星与超新星遗迹G308.8-0.1成协 [151],并且这个源已经被发现是一颗频繁发生跳变的脉冲星。Wang et al. (2000)和Weltevrede et al. (2010)一共已经为这颗星报告过14次跳变 事件 [99,118]。图3.5给出了从1994年7月到2010年9月的这颗星的脉冲频 率ν与脉冲频率一阶导数ν的演化,其间总共发生了17次跳变。在这里我们 报告9个新的跳变。对于跳变6,我们观测到了其后的指数恢复,这个恢复 的恢复比例为Q~0.0112,时间常数为τ_d~24天。不过,对于所有其它的 跳变,我们的观测不足以分析它们的后跳变行为。跳变1和2由Wang et al. (2000)报道 [99]。不过,我们的20 cm数据不够充分,不足以测到这两个事 件。但是,观测频率为1700-2000 MHz 的数据清晰的表明了这两个跳变的 存在。我们使用了由Wang et al. (2000)提供的DM值717.3 cm⁻³ pc来修正由 星际介质所导致的色散。
- PSR J1412-6145 这颗星在Parkes多波束巡天项目中被发现 [116]。迄今为止, 对这颗星还没有关于跳变事件的报导。我们在这里报告一次大尺度的跳变 事件。这个跳变发生在2000年的11月,比例尺度为 $\Delta \nu_{\rm g}/\nu \sim 7.2 \times 10^{-6}$ 。 如图3.5所示,在这次跳变之后存在明显的指数与线性恢复的结构。其中 的指数恢复可以由 $Q \sim 0.00263 \pi_{\rm d} \sim 60$ 天来表征。这两个弛豫过程使得 在跳变发生时自转减慢率|i|的增加得到部分恢复。

PSR J1413-6141 图3.5给出了这颗脉冲星在大约13年里的脉冲频率v和脉冲频

率一阶导数 $\dot{\nu}$ 的演化,并且表明在这段时间内一共有7次跳变事件发生。在 这些跳变当中,有3个比较小,相对尺度为 $\Delta\nu_{\rm g}/\nu \sim 10^{-8}$ 。另外的4个要大 一些,相对尺度为 $\Delta\nu_{\rm g}/\nu \gtrsim 10^{-6}$ 。对于这些跳变,我们没有观测到后跳变 的指数恢复过程。表3.3给出,在最近的5次跳变之后,我们均测到了明显 的脉冲频率二阶导数值。对于跳变4,我们拟和了脉冲频率二阶导数的长 期变化,给出 $\Delta\ddot{\nu}_{\rm p} = 491(42) \times 10^{-24} \, {\rm s}^{-3}$ 。从表3.3得出,脉冲频率二阶导 数 $\ddot{\nu}$ 的前/后跳变解的差值为457(40) × 10⁻²⁴ \, {\rm s}^{-3},这与拟和值是相一致的。

- **PSR J1420**-6048 如图3.5所示,对于这颗脉冲星我们一共测到了5个跳变事件。跳变4首先由Weltevrede et al. (2010)报告 [118]。所有的这5个跳变都比较大,相对尺度为 $\Delta \nu_{\rm g}/\nu \sim 10^{-6}$ 。后跳变的脉冲频率一阶导数的演化表现出线性恢复过程,并且在跳变发生之后 ν 发生了变化(见表3.3和3.4)。跳变2表现出了后跳变的指数恢复过程,拟和给出恢复比例为 $Q \sim 0.008$,时间常数为 $\tau_{\rm d} \sim 99$ 天。对于跳变5,目前的观测还不足以分析其后跳变的计时行为。
- PSR J1452–6036 这颗脉冲星在以前还没有过关于其发生跳变的报道。 在Parkes,在多波束巡天项目之后 [131],对于这颗脉冲星的观测没有持续的进行。一直到Fermi项目的启动,对于这颗星的观测,才重新开始。因此,在我们的数据中存在一个长约5年的间隔。图3.5给出了我们测得的脉冲频率ν与脉冲频率一阶导数ν的演化。我们测到了一个尺度比较小的跳变,相对幅度为Δνg/ν~3×10⁻⁸。目前的观测尚不足以分析这个跳变的后跳变计时行为。
- **PSR J1453-6413 (PSR B1449-64)** 这颗脉冲星由Molonglo天文台发现并且还没 有关于跳变事件的报告 [152]。图3.5给出了我们测得的脉冲频率ν与脉冲 频率一阶导数ν在12年内的演化。我们测到了一个幅度很小的跳变,相对 尺度只有Δνg/ν~3×10⁻¹⁰。由于数据不充分的原因,我们无法分析后跳 变的计时行为。
- PSR J1531-5610 PSR J1531-5610尚无关于其跳变事件的报道。如图3.5所示, 我们测到了一个发生在MJD~51730 (July 2000)的幅度比较大的跳 变。与PSR J1412-6145相似,这颗星在跳变发生时表现出了一个脉冲 频率一阶导数ν的偏置,在跳变发生之后表现出了指数恢复的结构以 及一个缓慢的长期的线性恢复结构。我们的拟和显示指数恢复过程可 以由Q~0.007和τ_d~76天来表征。在跳变之后的脉冲频率二阶导数

为 $\ddot{\nu} \sim 20 \times 10^{-24} \,\mathrm{s}^{-3}$ 。

- **PSR J1614–5048 (PSR B1610–50)** PSR J1614–5048已经在Parkes被观测了大约20年的时间。图3.5示出了我们测到的两个跳变。这两次事件的幅度都比较大,相对尺度为 $\Delta\nu_g/\nu > 6 \times 10^{-6}$ 。这颗脉冲星表现出了非常显著的计时噪声,在脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 中存在的大规模的涨落可以反映出这一点。因此,两次跳变之间跨越完整数据段的相位连贯的计时解并不能够得到。我们只能够分两段分别报告计时解(见表3.3)。跳变1已经由Wang et al. (2000)报告,我们的测量结果(包括 $\Delta\nu_g/\nu$ 和 $\Delta\dot{\nu}_g/\dot{\nu}$)与那里给出的相一致。跳变2是一个新的探测。脉冲频率二阶导数 $\ddot{\nu}$ (见表3.3)存在非常明显的变化,不过,需要注意的是这些测量值可能受到了计时残差的严重影响。尽管如此,在跳变1之后,我们还是可以发现一个比较明显的线性恢复过程, $\ddot{\nu}$ 大约为200×10⁻²⁴ s⁻³。
- PSR J1646-4346 (PSR B1643-43) 图3.5给出了这颗星的脉冲频率ν与脉冲频率一阶导数ν在16年内的演化。我们测到了一个跳变,发生在MJD ~ 53875。这是一个中等尺度的跳变事件,相对幅度为Δνg/ν ~ 8.8 × 10⁻⁷。在跳变1之前的脉冲频率一阶导数ν的演化中,我们可以见到比较明显的线性增加。这可能是较早发生的跳变事件的线性恢复过程。
- PSR J1702-4310 历史上还没有关于PSR J1702-4310的跳变事件的报道。我们 在这里报告这颗星的一次跳变事件。我们的观测显示,在跳变发生之 后伴随着指数恢复过程和线性恢复过程。而且,我们发现在跳变发生 之前的脉冲频率一阶导数ν 的演化也表现出线性衰减的过程。跳变的发 生并没有使得ν有明显的变化。拟和显示,后跳变的指数恢复过程可以 由Q ~ 0.023和τ_d ~ 96天来表征。在跳变发生之前的数据段中存在一个为 期大约为3年的间隙。不过,我们发现这颗星所表现出的计时不规则性比 较小,使得我们可以找到跨越这个间隙的相位连贯的计时解。
- PSR J1709-4429 (PSR B1706-44) PSR J1709-4429是一颗年轻的脉冲星,与超新星遗迹G343.1-2.3成协 [153]。图3.5给出了这颗脉冲星的脉冲频率ν与脉冲频率一阶导数ν在20年内的演化。一共有4次跳变事件被测到。这些跳变的幅度都比较大,相对尺度为Δνg/ν > 1 × 10⁻⁶。Johnston et al. (1995)和Weltevrede et al. (2010)已经报告了跳变1和4 [154,118]。但是,目前还没有关于后跳变行为的报告。如图3.5所示,这4次事件的后跳变行为均表现出指数和/或线性恢复过程,显著的脉冲频率二阶导数的变化在

前3次跳变发生之后都有所发生(见表3.3)。我们发现所测得的指数恢复的恢复比例都比较小,均大约为0.01,并且事件常数都大约为100天(参见表3.4)。

- **PSR J1718**–3825 这颗星还不曾有过跳变事件的报告。图3.5给出了这颗星13年 内的脉冲频率 ν 与脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 的演化。我们测到了一次跳变事件, 发生在MJD ~ 54910。这个跳变的幅度比较小,相对尺度只有 $\Delta \nu_{\rm g} / \nu \sim 2 \times 10^{-9}$ 。
- PSR J1730-3350 (PSR B1727-33) 这颗星曾经有过两次跳变事件的报告,分别 发生在MJD ~ 48000和MJD ~ 52107 [154,95]。这两个跳变的幅度都比较 大,相对尺度为Δνg/ν > 3 × 10⁻⁶。图3.5示出了MJD ~ 52107跳变。在跳 变发生之后伴随有明显的指数恢复与线性恢复过程。指数恢复的比例比较 小,只有大约0.01,时间常数约为100天。
- **PSR J1731**—4744 (**PSR B1727**—47) **PSR J1731**—4744在Molonglo脉冲星巡天项目 中被发现 [155]。在这个脉冲星中已经测到过3个跳变事件 [156,99,95]。 图3.5一共示出4次跳变事件。跳变1,2和3为以前报告过的跳变事件。 跳变4 为一次新的探测。跳变1和3的相对尺度为 $\Delta \nu_g / \nu \sim 1 \times 10^{-7}$,而 跳变2和4的相对尺度为 $\Delta \nu_g / \nu \sim 3 \times 10^{-9}$ 。我们发现在跳变3之后存在 一次指数恢复过程,该过程可以由 $Q \sim 0.073 \pi_{Td} \sim 210$ 天来表征。在 每一次跳变之后似乎都存在一点线性恢复的迹象,尽管脉冲频率一 阶导数 ν 表现出明显的噪声。脉冲频率二阶导数 ν 的测量值都比较小, 在 1×10^{-24} s⁻³到20 × 10⁻²⁴ s⁻³之间变化。对于跳变2,Wang et al. (2000)给 出的跳变发生时间为MJD 50703(5)。我们通过假设跳变发生时脉冲相位保 持连贯定出脉冲发生时间为MJD 50715.9(8)。
- PSR J1737-3137 自从Parkes多波束巡天项目的观测结束之后 [126],对于PSR J1737-3137的观测直到Fermi项目的启动才重新开始。因此,在数据当中存在一个长约7年的间隙。对于这颗脉冲星,已经有3次跳变事件的报道 [118,95]。如图3.5所示,最近的一次跳变事件被我们的观测所探测到。这个跳变的幅度比较大,相对尺度为Δνg/ν~10⁻⁶。从我们得到的对于脉冲频率一阶导数ν的测量来看,在跳变发生时ν很有可能存在一个很明显的增加,并且这个增量可能为后续的指数与线性衰减所恢复。不过,我们的数据不够充分,还不足以对此进行确认。

PSR J1740-3015 (PSR B1737-30) PSR J1740-3015由Clifton & Lyne (1986)发现

[157]。这颗脉冲星被发现是发生跳变事件最为频繁的脉冲星之一。在过 去的25年当中,已经有31次跳变事件被发现。图3.5给出了我们对于这颗 星的13年的观测。实际上,在这13年当中,这颗星已经有过17次跳变事 件的记录 [146,158,138,159,94,118,95]。但是,由于我们对于这颗星的观 测采样非常的低,所以只有5次幅度比较大的跳变事件可以探测到。其 中,跳变5是一个新发现的事件。这次跳变的幅度比较大,相对尺度达 到Δν_g/ν ~ 2.7 × 10⁻⁶。这是在这颗星当中测到的最大的一个跳变。在 这5个测到的跳变之后,我们均能发现线性衰减存在的迹象。但是,我们 无法测到指数衰减。如果这样的衰减过程存在的话,那么时标很可能小于 几十天。

- **PSR J1801–2304 (PSR B1758–23)** 在过去的24年里, PSR J1801–2304被发现一 共发生过9次跳变 [160, 161, 99, 158, 94, 95]。图3.5给出了脉冲频率 ν 与脉 冲频率一阶导数 ν 在~ 20年内的变化。由图可见,一共有8次跳变事件 被探测到,其中最近的一次为新的发现。这个跳变比较小,相对幅度 为 $\Delta \nu_{\rm g}/\nu \sim 4 \times 10^{-9}$ 。对于跳变4, Wang et al. (2000)拟合了一个指数恢 复项,时间常数被假定为100天。但是,我们的观测表明后跳变的计 时行为由一个线性衰减过程所主导,测量得到的脉冲频率二阶导数 为 $\nu \sim 40 \times 10^{-24}$ s⁻³。
- **PSR J1801**—2451 (PSR B1757—24) PSR J1801—2451是一颗周期为124 ms的脉冲 星。它位于一个致密的射电星云的中心附近,并且整个星云处于超新 星遗迹G5.4—1.2 的西侧 [162]。图3.5给出了脉冲频率 ν 与脉冲频率一阶导 数 $\dot{\nu}$ 在~18年内的演化,一共有5个跳变被测到。这些跳变事件已经有所公 布 [163,99,118,95]。对于脉冲频率一阶导数的测量显示,后跳变的计时行 为很可能为线性恢复过程所主导,不过指数恢复可能同时存在 [163,99]。 在我们的工作中,我们为跳变3和5拟合了指数恢复项,结果显示跳变3可 以由 $Q \sim 0.025 \pi_{Td} \sim 200$ 天来表征,跳变5可以由 $Q \sim 0.0065 \pi_{Td} \sim 25$ 天 来表征。
- PSR J1803-2137 (PSR B1800-21) PSR J1803-2137是一颗133 ms的脉冲星,特征年龄为15 kyr。在这颗脉冲星中,已经测到了4次跳变 [161,99,158,94,95]。图3.5示出了我们测到的两次跳变事件。这两次跳变都表现出了明显的线性衰减过程,并且斜率比较接近。与此同时,指数形式的恢复过程也被发现伴随着这两次跳变事件。对于跳变1,Wang et al. (2000)使用

一个短时标($\tau_{d} \sim 18$ 天)和一个较长时标($\tau_{d} \sim 850$ 天)的指数恢复项 来刻画后跳变的计时行为[99]。我们发现,实际上,在这次跳变之后有 两个时标较短的指数恢复过程相伴随,一个的时间常数大约为12天,另 一个69天。更进一步的弛豫由线性衰减过程所主导。对于跳变2,Yuan et al. (2010)测到了一个指数恢复过程,恢复比例为 $Q \sim 0.009$,时间常数 为 $\tau_{d} \sim 120$ 天。我们的分析与他们的相一致,恢复比例为 $Q \sim 0.0063$,时 间常数为 $\tau_{d} \sim 135$ 天。

- PSR J1809-1917 这颗脉冲星曾经有过一次跳变事件的报告 [95]。图3.5给出了 脉冲频率ν与脉冲频率一阶导数ν 在~ 12年内的演化,表明了以前探测到 的这一次跳变。这个跳变的幅度比较大,相对尺度为Δνg/ν~1.6×10⁻⁶。 后跳变计时行为中的指数与线性恢复过程被我们清晰的观测到。拟合给出 指数恢复过程可以由Q~0.006和τ_d~125天来描述。在跳变发生之前,脉 冲频率一阶导数ν表现出线性恢复的特征,这可能是先前发生的一次跳变 所导致的恢复过程。在跳变发生之后,线性恢复过程依然清晰可见,脉冲 频率二阶导数比跳变发生前略小。不过,这个变化并不是很大,前/后跳 变的计时解均有ν~35×10⁻²⁴ s⁻³。
- PSR J1825–0935 (PSR B1822–09) 这颗脉冲星由Davies et al. (1972)发现 [164]。 到目前为止,一共有8个跳变被发现,其中,6个为"慢"跳变事件 [104,106,94,95]。在观测上,Lyne et al. (2010)发现这些慢跳变过程可能体 现了磁层的一种"双态"过程 [165]。图3.5给出了脉冲频率ν与脉冲频率一 阶导数ν在9年内的变化。在这段时间里,实际上这颗星被发现经历过3次 慢跳变事件 [104,106,94]。由于观测得不充分,使得我们无法测到这3个事 件。利用现有的数据,我们测到了一个"正常"跳变事件。这个跳变的尺 度中等,相对幅度为Δν_g/ν~1.3×10⁻⁷。但是,一个为期大约500天的数 据间隙存在于跳变之后,使得我们无法分析这个跳变的后跳变行为。不 过,这个跳变已经由Yuan et al. (2010)做出了详细的分析 [94]。
- PSR J1826-1334 (PSR B1823-13) 这颗脉冲星已经被报道发生过5次跳变 [161, 94,95]。图3.5给出了脉冲频率v和脉冲频率一阶导数v在大约13年里的演化。由图可见,我们的观测探测到了两次跳变事件。这两个事件已经有所报道。对于跳变1,我们的在跳变发生前的最后一次观测是在MJD ~ 53186,在跳变发生后的第一次观测是在MJD ~ 53279。Espinoza et al. (2011)指出实际上在这段时间间隔里,有两个跳变发生。这两个事件都非

常小,一个发生在MJD~53206,相对幅度为 $\Delta \nu_{g}/\nu \sim 0.6 \times 10^{-9}$,一个发 生在MJD~53259,相对幅度为 $\Delta \nu_{g}/\nu \sim 3 \times 10^{-9}$ [95]。跳变2要大很多, 并且也已由Yuan et al. (2010)和Espinoza et al. (2011)报道 [94,95]。我们在 跳变2之后测到了一个指数衰减过程,衰减比例为 $Q \sim 0.007$,时间常数 为 $\tau_{d} \sim 80$ 天。

- **PSR J1835–1106** 图3.5给出了**PSR J1835–1106**在10年的时间里的脉冲频率 ν 与脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 的演化。我们测到了一个幅度比较小的跳变,相对尺度为 $\Delta \nu_{\rm g}/\nu \sim 1.6 \times 10^{-8}$ 。这个事件也已经被Zou et al. (2004)和Espinoza et al. (2011)观测到 [104,95]。如图3.5所示,后跳变的脉冲频率残差表现出一个明显的三次曲线,意味着一个可以测量的脉冲频率三阶导数 $\ddot{\nu}$ 。对相位 残差的拟合显示这一项为 $\ddot{\nu} = 1.58(13) \times 10^{-31} \, {\rm s}^{-4}$ 。这个显著的高阶频率导数表明了脉冲星转动中存在的噪声过程。有可能这颗脉冲星中也存在磁 层的双态过程,影响了脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ [165]。
- PSR J1841-0524 这颗脉冲星已经被发现发生过3次跳变 [95]。前两个比较小, 相对幅度为Δν_g/ν ≥ 2 × 10⁻⁹。最近的一次跳变事件比较大,相对幅 度为Δν_g/ν ~ 10⁻⁶。Parkes数据存在一个间隙,从MJD ~ 52570到MJD ~ 53619。因此,我们无法探测到发生在MJD ~ 53562的跳变。图3.5给出 了这颗脉冲星在最近5年的脉冲频率ν与脉冲频率一阶导数ν的演化。可以 发现,至少对跳变2来说,后跳变的计时行为表现出了一个线性衰减过 程。

PSR J	雀	跳变纪元 (MJD)	新? (N/P)	$\Delta u_{ m g} / u (10^{-9})$	$\Delta\dot{ u}_{\mathrm{g}}/\dot{ u}_{\mathrm{g}}$	$^{\Delta\dot{\nu}_{\rm p}}_{(10^{-15}{\rm s}^{-2})}$	$^{\Delta\ddot{\nu}_{\rm p}}_{(10^{-24}{\rm s}^{-3})}$	Q	7 _ط (d)	TOA 数目	时段 (MJD)	Rms残差 (ms)	χ^2_r [d.o.f]
729-1448	- 0 c 4	54316.8(3)* 54479.5(9)* 54589.8(9)* 54681(9)	ፈ ፈ ፈ	21.2(7) 15.4(7) 13.0(9) 6651.6(8)						21 15 15	54220 - 54380 54351 - 54565 54485 - 54673 54597 - 54763	$\begin{array}{c} 0.42 \\ 0.55 \\ 0.44 \\ 0.58 \end{array}$	6.25[16] 11.4[10] 10.8[7] 16.0[9]
742-2822	-	$55020.66(9)^{*}$	Р	102.73(11)	2.1(5)	-1.3(3)			,	06	54772 - 55309	0.60	8820[83]
834-4159	-	53415(2)*	Z	1.85(4)	0.26(4)	-0.07(1)				25	52822 - 54144	0.30	2.43[19]
835-4510	- 0 c 4	$\begin{array}{c} 50369.394^{1} \\ 51559.3190(5)^{2} \\ 53193.09^{3} \\ 53959.93^{4} \end{array}$	4 4 4 4	2133(10) 3140(46) 2059(6) 2585(3)	7.7(4) 8(4) 11(2) 8.1(5)	-76(3) -57(11) -104.1(8) -72(2)	- - 304(23) -	0.030(4) 0.02(1) 0.009(3) 0.0119(6)	186(12) 125(83) 37(11) 73(8)	$159 \\ 58 \\ 78 \\ 103 $	$\begin{array}{c} 50214 - 50669 \\ 51093 - 51900 \\ 52666 - 53803 \\ 53523 - 54390 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.17 \\ 4.04 \\ 0.99 \\ 0.73 \end{array}$	11.3[150] 4600[49] 245[68] 124[94]
905-5127	1 2	49552(2)* 52931(67)	zz	13.6(4) 8.31(16)(53)	-1.8(9) 1.2(1)	0.38(18) -0.258(20)	1 1			$\begin{array}{c} 11\\ 16\end{array}$	$\begin{array}{r} 49364 - 49644 \\ 52463 - 53367 \end{array}$	0.23 0.55	4.89[5] 165[10]
016-5857	1 2	52549(22) 55041(30)	zz	1622.6(3)(51) 1912.4(3)	3.69(5) 4.4(3)	-25.8(3)(4) -31(2)	- (7)			$^{97}_{13}$	51941 - 53244 54858 - 55236	$1.89 \\ 0.24$	717[89] 7.14[6]
048-5832	- 0 % 4 % 9	48946.9(2)* 49034(9) 50791.485(5) ⁵ 52733(37) 53673.0(8)* 54495(10)	ΑΑΑΖΖΑ	17.95(19) 2995(26) 768(3) 1838.4(5)(90) 28.5(4) 3042.56(14)(339)	- 3.7(8) 3.7(3) 0.19(14) 5.6(1)	- - 23(2) - 12(9) - 32.2(7)		0.026(6)(7) 0.008(3) - -	- 160(43) 60(20) - -	17 28 33 23 23	$\begin{array}{r} 48814 - 49025 \\ 48957 - 49236 \\ 50703 - 50339 \\ 52312 - 53151 \\ 53349 - 53359 \\ 54303 - 54690 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.17\\ 0.39\\ 0.12\\ 2.72\\ 0.88\\ 0.28\end{array}$	17.5[11] 84.3[20] 67[35] 25200[26] 2002[16] 1050[25]
052-5954	-	54495(10)	Ь	495(3)(7)	86(14)(19)	-6.4(5)		0.067(4)(13)	46(8)	32	54220 - 54787	1.05	4.26[24]
105-6107	- 0 c 4	50417(16) 51598(147) 54711(21) 55288(16)	a z a z	279.20(7)(36) 971.7(2)(5) 29.5(3)(15) 954.42(7)	1.07(20) 0.13(9) 3.4(6) -	-4.2(8) -0.5(4) -13(3) -				38 32 26 21	$\begin{array}{r} 50267 - 50576 \\ 50986 - 52004 \\ 54504 - 54903 \\ 55145 - 55461 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.086 \\ 0.36 \\ 0.40 \\ 0.13 \end{array}$	5.02[31] 49.5[25] 169[19] 40.2[15]
112-6103	1 2	51395(134) 53337(30)	ΖZ	1825(2)(25) 1202(20)(21)	4.66(11)(38) 7(2)	-34.8(8)(29) -35(3)	242(20) -	0.022(2)	- 302(146)	81 44	50850 - 52397 52661 - 54008	$1.04 \\ 1.37$	21.3[73] 78.0[35]
119—6127	0.01	51399(3)* 53293(13) 54244(24)	ሻ ሻ ሻ	4.4(3) 372(9)(80) 9372(290)(5849)	0.036(5) 8.9(4)(23) 580(14)(437)	-0.86(10) 2(2) 24.9(9)		- 0.84(3)(28) 0.214(7)(136) 0.81(4)(81)	- 41(2) 186(3) 15.7(3)	29 31 65	51258 - 51557 53148 - 53427 53651 - 54820	$0.72 \\ 0.23 \\ 3.31$	4.81[23] 0.77[22] 50.4[54]
301-6305	- 6	51923(23) 53383(12)	ΧZ	4630(2)(17) 2664(2)(6)	8.6(4)(11) 3.92(11)	-42.9(3) -30.7(8)		0.0049(3)(11) -	58(6)	59 17	51370 - 52507 53185 - 53523	$1.39 \\ 1.63$	2.97[50] 5.94[11]
341-6220	- 0 r	49775(12) 49904(16) 50008(16)	ዋ ዋ ዋ	12.2(3) 14(1) 1634(1)(5)	- - 2 87(17)	- - - 19(7)				14 13 16	49589 - 49888 49787 - 49992 40920 - 50190	0.30 0.28 0.49	5.91[8] 5.91[7] 6.17[10]

表 3.4 跳变参数。

3.4. 结果

χ^2_r [d.o.f]	5.96[8] 12.4[16] 4.49[35] 3.0.1[2] 3.0.1[2] 3.0.1[2] 10.0[3] 10.0[3] 10.0[3] 10.0[3] 10.0[3] 10.0[3] 10.0[3] 241.9[2] 541.9[2] 541.9[2] 541.9[2] 67.5[5] 67.5[2]	1.94[25] 15.9[14] 7.33[25]	3.66[3] 3.15[19] 4.47[6] 222[2] 2.64[11]	2.98[16] 2.83[37] 179[24] 48.0[33] 2.35[6] 8.18[14]	78.3[21]	57.8[13] 27.0[6]	32.6[10] 16.3[63]	336[96] 150[22] 22900[57] 49.2[40]	10.0[25]
Rms残差 (ms)	$\begin{array}{c} 0.35\\ 0.40\\ 0.40\\ 0.22\\ 0.35\\ 1.06\\ 0.33\\ 0.05\\ 0.16\\ 0.18\\ 0.18\\ 0.18\\ 0.18\\ 0.18\\ 0.18\\ 0.57\\ 0.57\\ 0.57\\ \end{array}$	0.58 4.26 1.53	$\begin{array}{c} 0.94 \\ 0.69 \\ 0.64 \\ 2.87 \\ 0.71 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.17\\ 0.16\\ 1.68\\ 0.62\\ 0.12\\ 0.054\end{array}$	0.054	$1.44 \\ 0.40$	2.09 0.92	$\begin{array}{c} 0.50\\ 0.23\\ 2.10\\ 0.14\end{array}$	0.15
时段 (MJD)	$\begin{array}{c} 50213 \\ 50213 \\ 50399 \\ 50576 \\ 50576 \\ 50799 \\ 50576 \\ 51241 \\ 510241 \\ 510241 \\ 51241 \\ 51241 \\ 51201 \\ 52235 \\ 52101 \\ 52235 \\ 52235 \\ 52235 \\ 52235 \\ 52371 \\ 53371 \\ 53371 \\ 5355 \\ 54975 \\ 54975 \\ 54975 \\ 55183 \end{array}$	51370 - 52348 $51146 - 51405$ $51370 - 51556$	$\begin{array}{c} 51472 - 52004 \\ 51844 - 52426 \\ 52771 - 53036 \\ 52990 - 53279 \\ 54112 - 54421 \end{array}$	$\begin{array}{c} 51333 - 51901\\ 52526 - 53105\\ 53488 - 54144\\ 54335 - 55011\\ 55304 - 55461\\ 54820 - 55304 \end{array}$	54335 - 54794 51453 - 52042	$\begin{array}{r} 49589 - 49985 \\ 52886 - 53150 \end{array}$	53524 - 54112 52883 - 54932	$\begin{array}{l} 47910 - 50026 \\ 50987 - 51901 \\ 51946 - 53734 \\ 54221 - 55104 \end{array}$	54451 - 55391
TOA 数目	$\begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\$	33 19 30	39 27 11 8 18	24 47 41 11 20	27 29	20 12	16 73	106 30 67 49	32
$ au_{\mathrm{d}}$	24(9) 	59(4) - -		- 99(29) - -	-		- 96(16)	122(3) - 155(29)(32) 85(2)	
Q	- - - - - - - - - - - - -	0.00263(8)(38) - -		0.008(4) - - -	-		- 0.023(6)(20)	$\begin{array}{c} 0.01748(8)(404)\\ -\\ 0.0129(12)(42)\\ 0.00849(7)(187)\end{array}$	
$\stackrel{\Delta \ddot{\nu}_{\rm p}}{_{(10^{-24}{\rm s}^{-3})}}$			- 491(42) -	281(62) -269(152) 371(234) 633(50) -			- 30(6)	70(2) 470(8) - 248(18)(20)	
$\substack{\Delta\dot{\nu}_{\rm p}}_{(10^{-15}{\rm s}^{-2})}$	$\begin{array}{ccc} -0.4(4) \\ -1.2(5) \\ -1.2(5) \\ -1.2(5) \\ -2 \\ -2 \\ -3.5(8) \\ -6.1(3) \\ -6.1(3) \\ -6 \\ -1 \end{array}$	-5.67(3) -	1.35(12) -1.1(8)(24) - - - 2(2)	$\begin{array}{c} -68(2)(24) \\ -90(6) \\ -70(5) \\ -86(1)(2) \\ - \\ -0.143(12) \end{array}$	-0.047(9)	-85(2) -83.8(4)	-3.1(8) -13.3(4)(6)	$\begin{array}{c} -18.72(11)(22) \\ -55.0(3)(15) \\ -44(2)(20) \\ -43.27(11) \end{array}$	0.28(9)
$\Delta\dot{ u}_{ m g}/\dot{ u}_{ m g}/\dot{ u}_{ m (10^{-3})}$	0.06(6) 0.18(8) - 3.3(3) 0.90(4) 	17.5(8)(19) - -	$\begin{array}{c} -0.33(3) \\ 0.28(20)(58) \\ - \\ 0.4(4) \end{array}$	$\begin{array}{c} 3.83(8)(14)\\ 6.6(8)(9)\\ 3.9(3)\\ 4.84(6)(8)\\ 2.37(20)\end{array}$	0.55(11)	9.3(3) 9.14(4)	1.5(3)(4) 17(4)(13)	5.86(8)(87) 6.22(3)(17) 8.0(7)(12) 8.41(8)(78)	-0.12(4)
$\Delta u_{ m g} / u$ (10^{-9})	27.3(4) 18.5(6) 18.5(6) 1709(2)(4) 1121.5(7)(8) 480(4) 480(4) 480(4) 2577(3) 219.2(4)(152) 277(3) 285(6) 19.4.0(4)(84) 317.2(4)(18) 309.6(6) 1579(2)	7253.0(7)(31) 39(4) 970(2)	59.7(4) 811(2) 46.9(8) 1410(5) 2409.8(7)(11)	1146.2(6)(302) 2019(10)(13) 1270(3)(4) 934.5(4)(97) 1346.00(18) 28.95(20)	0.299(18) 2637(2)(11)	6456.7(8)(257) 6242.4(6)(370)	885(3)(5) 4810(27)(104)	2050.6(4)(99) 1166.73(17)(1682) 2872(7)(26) 2743.9(4)(96)	1.94(3)
新? (N/P)	$\sigma \sigma \sigma X X X X X X X X T \sigma \sigma X$	z zz	ZZZZZ	ZZZQZZ	z z	d Z	zz	a z z a	z
跳变纪元 (MJD)	50332(10) 50532.(8)* 50683(13) 50683(13) 51144(11) 51144(11) 51144(11) 52250(16) 52250(16) 5228(17) 5228(17) 53232(10) 53471(17) 53232(10) 53471(17) 53232(10) 53471(11) 53232(10) 5348(18) 54871(11) 5388(18)	51868(10) 51290(3)* 51463(9)	51796.3(4)* 52092(53) 52899.4(3)* 53125(24) 54286(18)	51600(77) 52754(16) 53725(9) 53725(9) 5410(19) 55055.22(4)*	54552(4)* 51731(51)	49803(16) 53013(24)	53876(73) 53943(169)	48779(33) 51488(37) 52716(57) 54711(22)	54911(2)*
编号	4 6 6 7 6 6 7 4 4 7 6 6 7 7 6 6 7 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 2	m 4 v 9 r	- 0 m 4 v -		6		- 0 % 4	1
PSR J	J1341-6220	J1412-6145 J1413-6141		J1420-6048 J1452-6036	J1453-6413 11531-5610	J1614-5048	J1646-4346 J1702-4310	J1709-4429	J1718-3825

表 3.4 续表

- 69 -

PSR J	编	跳变纪元 (MJD)	新? (N/P)	$\Delta u_{ m g}/ u$ (10^{-9})	$\Delta \dot{ u}_{\mathrm{g}}/\dot{ u}$ (10^{-3})	$\overset{\Delta\dot{\nu}_{\rm p}}{}_{(10^{-15}{\rm s}^{-2})}$	$\frac{\Delta \ddot{p}_{ m p}}{(10^{-24}{ m s}^{-3})}$	Ó	رط) (d)	TOA 数目	时段 (OUD)	Rms残差 (ms)	χ^2_r [d.o.f]
J1730-3350	-	52107(38)	Р	3208(6)(15)	11(2)(3)	-20(1)	ı	0.0102(9)(34)	99(23)	30	51844 - 52458	0.60	127[22]
J1731-4744	- 0 % 4	49386.72(12)* 50715.8(9)* 52472.65(10)* 53582(6)*	d d d X	136.37(20) 3.90(15) 126(2) 2.69(12)	$\begin{array}{c} 1.25(11) \\ 0.46(14) \\ 2.7(5) \\ 0.2(2) \end{array}$	-0.30(3) -0.11(4) -0.041(19) -0.06(6)		- 0.073(7) -	- - 210(37) -	40 29 23	$\begin{array}{r} 49044 - 50026 \\ 50588 - 50819 \\ 51782 - 53243 \\ 53223 - 53949 \end{array}$	$\begin{array}{c} 1.03 \\ 0.16 \\ 0.84 \\ 0.36 \end{array}$	125[33] 62.1[14] 142[41] 51.4[16]
J1737-3137	-	$54352.334(8)^{*}$	Ь	1342.2(3)	3.01(15)	-2.0(1)	ı			26	54221 - 54505	0.66	1.65[20]
J1740-3015	- 0 c 4 v	50936.803(4) ⁵ 52348.1(8)* 53023.5190(4) ⁶ 54449(1)* 55220(14)	ዋ ዋ ዋ X	1440.7(3) 151(2) 1835(2) 41.0(7) 2664.50(15)(118)	0.97(3) 5.4(7) 4.69(18) 0.19(8) 1.35(3)	$\begin{array}{c} -1.23(4) \\ -6.8(8) \\ -5.9(3) \\ -0.24(10) \\ -1.71(3) \end{array}$				34 23 14 19	$\begin{array}{r} 50750 - 51155 \\ 52002 - 52659 \\ 52805 - 53223 \\ 54267 - 54634 \\ 55052 - 55364 \end{array}$	0.46 4.78 2.66 0.95 0.23	241[28] 26800[16] 10200[8] 9940[21] 546[13]
J1801-2304	-00400600	48453.68(6)* 49702.1(4)* 50054(2)* 509363.414(4) ⁷ 50936(9)* 52093(53) 53306.38(1) ⁶ 55336(3)*	d d d d d d d Z	348.3(3) 63.4(4) 22.5(5) 80.2(4) 80.2(4) 5.4(7) 649.1(3)(4) 493.29(10) 3.9(3)	-0.14(4) 0.3(1) -0.06(11) 0.61(13) -0.11(1) 0.19(5)	0.09(3) -0.20(6) 0.04(7) -0.40(9) - 0.09(7) -0.12(3)				$53 \\ 19 \\ 58 \\ 47 \\ 25 \\ 61 \\ 12 $	$\begin{array}{c} 47911 - \ 48896 \\ 43364 - \ 50026 \\ 49363 - \ 500363 \\ 50191 - \ 50647 \\ 51636 - \ 51211 \\ 51783 - \ 54232 \\ 52145 - \ 54380 \\ 55145 - \ 55507 \\ 55145 - \ 55507 \end{array}$	$\begin{array}{c} 2.07\\ 1.01\\ 1.25\\ 0.98\\ 0.94\\ 2.41\\ 0.48\end{array}$	8.10[47] 3.72[13] 7.43[30] 5.17[52] 12.7[41] 7.90[18] 28.8[54] 0.64[7]
J1801-2451	- 0 c 4 v	49475.95(3) ⁶ 50651.44(3) ⁶ 52054.74(7) ⁶ 53032(4)* 54653(19)	4 4 4 4 4	1989(1) 1245.27(12) 3757(26) 15.7(9) 3113(3)(15)	3.95(18) 3.37(7) 8(2) -1.0(5) 15(2)(6)	-32(2) -27.5(6) -25(5) 8(4) -49(2)		- - 0.024(5) 0.0064(9)(35)	- - 208(25) - 25(4)	20 25 20 20 20 20 20	$\begin{array}{l} 49160 - 49643 \\ 50462 - 50799 \\ 51879 - 52427 \\ 52805 - 53243 \\ 54451 - 54860 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.62 \\ 0.39 \\ 0.27 \\ 1.45 \\ 0.25 \end{array}$	50.3[13] 20.9[73] 16.3[16] 529[13] 5.92[11]
J1803-2137	- 6	50765(15) 53473(50)	d d	3220(4)(22) 3889(2)(30)	37.36(18)(2012) 8.96(18)(69)	-51.8(5) -50.97(20)	1 1	$\begin{array}{c} 0.00330(17)(64)\\ 0.0094(11)(65)\\ 0.00630(16)(196)\end{array}$	69(13) 12(2) 133(11)	54 46	50669 - 51451 52804 - 54145	0.16 0.67	12.2[43] 325[37]
J1809-1917 J1825-0935		53261(18) 54115.5(3)*	d d	1620.8(3)(19) 126.4(3)	5.84(17)(41) -	-10.90(7) -	3.5(8)	0.00602(9)(77) -	126(7) -	100 23	51783 - 54690 53949 - 55073	0.49 0.38	22.6[90] 471[17]
J1826-1334 J1835-1106	1 2 1	53236(2)* 53752(18) 52222.1(7)*	444	3.33(4) 3575(2)(9) 18.33(12)	0.054(18) 11.1(6)(11) 1.0(5)	-0.39(13) -47.5(6) -0.7(4)		_ 0.0066(3)(13) _	- 80(9) -	31 20 20	52805 - 53619 53423 - 54048 51945 - 52505	$\begin{array}{c} 0.18 \\ 0.06 \\ 0.33 \end{array}$	15.8[24] 1.80[11] 202[13]
J1841-0524	1 2	$54011.3(5)^{*}$ 54495(10)	Р	30.89(17) 1032.5(4)(6)	-0.131(18) 1.00(7)	0.15(2) -1.18(8)	, ,			26 27	53619 - 54485 54269 - 54762	$1.11 \\ 1.13$	1.86[20] 1.49[21]
* 在本工作 纪元参考	中,通 :1-[1	1过假定跳变发。 [39]; 2-[101]; 3	生时的机 (-[141]	目位连贯性求得的 ;4-[142];5-[14	纪元解。 16]; 6 - [95]; 7	- [158].							

表 3.4 续表

- 70 -

3.5 讨论

在上一个小节,我们报告了在165颗脉冲星的计时残差中搜索跳变事件的结果。一共有107次跳变被发现,并且46个事件为新的发现。这些新的发现中的多数为南天脉冲星中的跳变事件,这是北天的计时观测所无法探测的。不过,因为我们的数据采样的频率比较低,使得我们无法测到以前已经被报告过的22个跳变事件,这些事件的幅度往往比较小,相对尺度在10⁻¹⁰到10⁻⁸之间。对于跳变发生时所引起的脉冲频率一阶导数的变化Δ*i*g的测量同样非常依赖于观测采样。短时标的瞬态的指数衰减很容易被错过,而导致对Δ*i*g测量的不确定。对于一些跳变,我们测量的Δ*i*g与文献当中公布的结果不很一致。

总体来说,后跳变的计时行为表现出两种类型的恢复过程。一种是时标较 短的指数恢复过程,通常由恢复比例Q和时间常数τ_d来表征。一种是时标比较 长的线性恢复过程,通常用后跳变的脉冲频率二阶导数*ü*来表征。这两种恢复过 程都可以由观察后跳变的脉冲频率一阶导数的演化来鉴别。对于大多数情况, 我们的观测采样限制了我们对于时标小于20天的指数恢复过程的探测。不过, 我们在27次跳变当中明确的观测到了后跳变的指数恢复过程,时标在12到300天 之间。对于超过90%的跳变,我们均可以测量到脉冲频率二阶导数。多数情况 下,脉冲频率一阶导数的斜率在跳变发生前后变化不是很大,所以Δ*ü*_p不能够 被得到。对于13个跳变,斜率的变化比较显著,我们因而拟合了Δ*ü*_p。

我们发现的新的46次跳变事件使得我们能够进一步研究跳变事件的分布和 后跳变的计时行为。在下面的两个小节里,我们将就这两个问题分别进行讨 论。

3.5.1 跳变的分布

在图3.6中,我们给出跳变尺度分布的直方图。其中,上图关于跳变的相 对尺度Δν_g/ν。我们的结果显示,以前所发现的双峰分布被得到了进一步的 确认 [99,94,95]。在这个分布中的第一个峰在大约2×10⁻⁹处,第二个峰在大 约10⁻⁶处。我们的观测主要对于第二个峰有贡献。由于我们的观测采样往往 不够充分,探测相对尺度小于10⁻⁹的跳变往往比较困难。正如Espinoza et al. (2011)和其他作者注意到的,这个分布的左边缘非常强烈的受到观测采样的限 制。小尺度跳变的数目可能非常庞大,而导致在真实的尺度分布中,现在所看 到的小尺度对应的峰可能不会存在。但是,在分布当中所呈现的在10⁻⁷处的下

-71-



图 3.5 PSRs J0729-1448和J0742-2822中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu n \dot{\nu}$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 72 -



图 3.5 PSRs J0834-4159和J0835-4510中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu \pi i \mu \pi \mu$ 得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数i。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

-73-



图 3.5 PSRs J0905-5127和J1016-5857中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu n \dot{\nu}$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 74 -



Days after MJD 54200

图 3.5 PSRs J1048-5832和J1052-5954中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 ν 和i所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数i。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

-75 -



图 3.5 PSRs J1105-6107和J1112-6103中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu \pi i \rho$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数i。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 76 -



图 3.5 PSRs J1119-6127和J1301-6305中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu n \dot{\nu}$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 77 -



图 3.5 PSRs J1341-6220和J1412-6145中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu n \dot{\nu}$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 78 -



图 3.5 PSRs J1413-6141和J1420-6048中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu n \dot{\nu}$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 79 -



图 3.5 PSRs J1452-6036和J1453-6413中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu n \dot{\nu}$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 80 -



图 3.5 PSRs J1531-5610和J1614-5048中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu n \dot{\nu}$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 81 -



图 3.5 PSRs J1646-4346和J1702-4310中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu \pi i \rho$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数i。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 82 -



图 3.5 PSRs J1709-4429和J1718-3825中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu n \dot{\nu}$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 83 -



图 3.5 PSRs J1730-3350和J1731-4744中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu \pi i \rho$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数i。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 84 -



图 3.5 PSRs J1737-3137和J1740-3015中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu n \nu n \mu$ 拆推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数 ν 。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。



图 3.5 PSRs J1801-2304和J1801-2451中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu n \dot{\nu}$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。



图 3.5 PSRs J1803-2137和J1809-1917中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu n \dot{\nu}$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 87 -



图 3.5 PSRs J1825-0935和J1826-1334中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu \pi i \rho$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数i。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 88 -


图 3.5 PSRs J1835—1106和J1841—0524中的跳变。上子图显示脉冲频率残差, $\Delta \nu$,由扣除通过第一个前跳变解中的 $\nu n \dot{\nu}$ 所推算得到的脉冲频率而得来;中子图将对于脉冲频率残差 $\Delta \nu$ 的表示进行了放大,通过将间跳变(或后跳变)的均值扣除得到;下子图显示脉冲频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 。图中垂直的虚线指示出跳变发生的时间,虚线顶端的数字为在本工作的数据当中所测到的跳变的序号。

- 89 -

沉是非常明显的并且暗示着可能存在两种可以导致跳变事件发生的机制。正如 在前面提到过的,小幅度的跳变可能是壳层破碎导致的星震产生的而大幅度的 跳变可能是壳层当中的超流体向星体转移角动量产生的。跳变的相对尺度同时 被跳变的绝对尺度和脉冲星的脉冲频率所影响。在图3.6 的下子图中,我们画出 跳变的绝对幅度Δνg的直方图。由图可见,跳变的绝对幅度的分布同样表现出 一个双峰分布的模式,或者说至少在小和大的跳变之间,分布存在一个下沉。 有意思的是,在绝对尺度的分布中,大跳变比在相对分布中表现的要窄,而小 跳变在绝对尺度的分布中比在相对尺度的分布中要宽。在绝对分布图中,大跳 变的很窄的尖峰主要由两颗星贡献,即PSR J0537–6910和PSR J0835–4510。这 两颗脉冲星有非常频繁的跳变而且多数跳变的绝对幅度为大约20 Hz。但是它们 的脉冲频率却相差6倍。

图3.7为一组周期—周期导数($P - \dot{P}$)图。图中表现了6个与跳变相关的物理量。对于以前公布的跳变事件,我们参考ATNF Pulsar Catalogue glitch table。 六个子图依次表示: a) 一脉冲星中测到的跳变的数目 N_g , b) 平均到每一年的跳 变数目 \dot{N}_g , c) 相对幅度 $\Delta \nu_g / \nu$, d) 绝对幅度 $\Delta \nu_g$, e) 方均根相对幅度, f) 由相 对幅度的均值归一化的方均根相对幅度。对于子图c)和d),如果某一脉冲星有多 次跳变,那么我们选择最大值。在每一张子图中,标记(圆圈或三角形)的尺 寸是相应物理量大小的线性函数。线性函数由一个斜率和一个常数决定。对于 图3.7 中的各个子图,我们通过调整斜率与常数值来为标记给出合适的尺寸。

表3.5具体给出了观测到的跳变的数目,观测时间范围和跳变发生的频率 (或平均到一年内的跳变数目)。现在已经发现有7颗脉冲星发生过10次(含) 以上的跳变。对这些脉冲星,图3.8给出了跳变相对幅度的时间序列。而且,这 些脉冲星也已在图3.7中被数字标出。

根据以上得到的这些观测结果,我们可以作出如下结论:

• 跳变现象多发生于特征年龄在10³至10⁵年之间的脉冲星,观测到的具有10次以上跳变记录的7颗脉冲星的特征年龄均在这个范围内。如果在磁偶极模型的假设下,这7颗脉冲星的磁场在~10¹²到~10¹³G之间。但是,观测表明尽管对于有些年轻脉冲星也已持续检测了相当长的一段时间,但是它们还没有被发现经历过跳变现象。比如PSR J1513-5908,这颗星的特征年龄为~1.5 kyr,是我们的165颗脉冲星样本中最年轻的一颗。它已经被观测了长达28年之久,但是尚无跳变事件报告[194]。然而,具有特征年龄~1.6 kyr的PSR J1119-6127在13年的观测历史中已经有过3次跳变记

- 90 -



图 3.6 上图:跳变相对尺度的直方图。下图:跳变绝对尺度的直方图。



图 3.7 表征与跳变相关物理量的*P* – *P*图。其中, a) 跳变数目, b) 平均每年的跳变数目。标记圆圈表示相应的值来自ATNF Pulsar Catalogue glitch table, 三角形表示相应的值来自本工作。在各个子图中,一些脉冲星被额外标记: 1 – PSR J0534+2200, 2 – PSR J0537–6910, 3 – PSR J0835–4510, 4 – PSR J1341–6220, 5 – PSR J1740–3015, 6 – PSR J0631+1036, 7 – PSR J1801–2304和两颗超磁星: A – PSR J1048–5937, B – PSR J1841–0456。

- 92 -



图 3.7 表征与跳变相关物理量的P – P图。其中,c)最大的相对幅度,d)最大的绝对幅度。标记圆圈表示相应的值来自ATNF Pulsar Catalogue glitch table,三角形表示相应的值来自本工作。在各个子图中,一些脉冲星被额外标记:1 – PSR J0534+2200,2 – PSR J0537-6910,3 – PSR J0835-4510,4 – PSR J1341-6220,5 – PSR J1740-3015,6 – PSR J0631+1036,7 – PSR J1801-2304和两颗超磁星:A – PSR J1048-5937, B – PSR J1841-0456。

- 93 -



图 3.7 表征与跳变相关物理量的*P* – *P*图。其中, e) 方均根相对幅度, f) 由相对幅度 均值归一化的方均根幅度。标记圆圈表示相应的值来自ATNF Pulsar Catalogue glitch table, 三角形表示相应的值来自本工作。在各个子图中,一些脉冲星被额外标记: 1 – PSR J0534+2200, 2 – PSR J0537–6910, 3 – PSR J0835–4510, 4 – PSR J1341–6220, 5 – PSR J1740–3015, 6 – PSR J0631+1036, 7 – PSR J1801–2304和两颗超磁星: A – PSR J1048–5937, B – PSR J1841–0456。

- 94 -



图 3.8 七颗脉冲星的跳变事件时间序列。标记圆圈表示来自ATNF Pulsar Catalogue glitch table 的数据,而三角形表示来自本文的数据。脉冲星的特征年龄被标注在括号中。

J 名称	名称	范围 (MJD)	$N_{\rm g}$	$\dot{N}_{ m g}$ (yr ⁻¹)	参考
$10007 + 7^{2}$	303 10007+7303	54682 — 55222	1	0.676	[166]
10146 ± 6	45 4U 0142+61	49613 - 54239	2	0.158	[167 168]
10147 ± 50	$P_{143} = P_{144} + 50$	52496 54921	1	0.156	[107,100]
J0147+32	12 D0144+39	32460 - 34631	1	0.100	[94]
J0157+6.	212 B0154+61	46866 — 50496	1	0.101	[158]
J0205+64	149 J0205+6449	52327 — 54669	2	0.312	[169]
J0358+54	413 B0355+54	41808 — 54946	6	0.167	[95]
J0406+6	138 B0402+61	52469 — 54830	1	0.155	[94]
J0502+40	654 B0458+46	46238 — 54946	1	0.0419	[95]
J0528+22	200 B0525+21	45010 - 54947	3	0.110	[95]
J0534+22	200 B0531+21	40491 — 54947	24	0.606	[95]
10537-6	010 10537_6010	51107 - 53068	23	3 03	[170]
10540 60	10 90537 = 0010	50150 - 52025	20	0.191	[170]
J0540-05	719 D0540-09	50150 - 52955	1	0.151	[1/1]
J0601-0	02/ B0559-05	44815 — 54948	1	0.0360	[95]
J0631 + 10	J36 J0631+1036	49994 — 54942	12	0.886	[95]
J0633+17	746 J0633+1746	41725 — 51673	1	0.0422	[172]
J0659+14	414 B0656+14	43955 — 54949	2	0.0664	[95]
J0729-18	336 B0727-18	43584 — 54949	2	0.0643	[95]
J0729-14	148 J0729-1448	54218 — 55429	4	1.21	本工作
J0742-28	322 B0740-28	44838 — 55579	7	0.238	[95]、本工作
J0758-15	528 B0756-15	47133 — 54939	1	0.0468	[95]
10834-4	159 10834-4159	51299 — 55145	1	0.0950	本工作
10835-4	50 B0833_45	40276 - 55172	16	0.302	[173] 木工作
10005 5	10 D0055 45	40263 55172	20	0.126	[175], 平工IF 木工作
10022 + 0	127 J0000 = 0127	54800 55054	1	1.01	平上IF [174]
J1016-58	357 J1016-5857	54892 - 55234 51299 - 55429	$\frac{1}{2}$	0.177	[1/4] 本工作
					1
J1048-58	332 B1046-58	47910 - 55183	6	0.301	本 上作
J1048-59	937 1E 1048.1-5937	7 52386 - 54202	2	0.402	[175]
J1052-59	954 J1052-5954	54220 - 55460	1	0.294	本工作
J1105-6	107 J1105-6107	49589 — 55461	4	0.249	本工作
J1112-6	J1112-6103	50850 — 55207	2	0.168	本工作
J1119-6	J27 J1119-6127	50852 — 55576	3	0.232	本工作
J1123-62	259 J1123-6259	49316 - 51155	1	0.199	[99]
J1124-59	916 J1124-5916	54682 - 55415	1	0.498	[166]
$I1141 - 3^{\circ}$	322 I1141-3322	49420 - 54940	1	0.0662	[95]
J1141-65	545 J1141-6545	53834 — 54785	1	0.380	[176]
11301 G	805 11301 6305	500/1 5510/	0	0.175	木工作
11202 G	350 B1250 63	47900 52000	∠ 1	0.173	11771
J1302-0.	DI209-00	47900 - 32900	1	0.0730	[1//]
J1528-4	DIDZD-45	45500 - 44098	1	0.087	[1/0] [001 未工 <i>版</i>
J1341-62 J1357_6	20 B1338-62 129 I1357-6429	4/915 — 55461 51458 — 53104	23	1.11 0.222	[99], 平工作 [170]
J1337-04	F27 J1557-0427	51+50 - 55104	T	0.222	[1/7]
J1412-6	I45 J1412-6145	50850 — 55461	1	0.0792	本工作
J1413-6	41 J1413-6141	50850 — 55461	7	0.554	本工作
11/20 60					
J1420-00)48 J1420-6048	51100 — 55461	5	0.419	本工作
J1420-00 J1452-60)48 J1420-6048)36 J1452-6036	51100 — 55461 54220 — 55461	$\frac{5}{1}$	$0.419 \\ 0.294$	本工作 本工作

表 3.5 续表

J名称	名称	范围 (MJD)	$N_{\rm g}$	$\dot{N}_{ m g}$ (yr ⁻¹)	参考
11500 + 5521	D1508 + 55	40500 42000	1	0.949	[190]
$J1509 \pm 5531$ J1521 = 5610	DI500755	40300 - 42000	1	0.245	[160] 木工佐
J1551 - 5010 J1522 + 2745	J1551-5010 D1520+27	51213 - 53401	1	0.0800	半上1F [05]
J1552+2745	B1530+27	45109 - 54940	1	0.0371	[95] 末工作
J1614-5048	B1610-50	4/910 - 55461	2	0.0967	半工作
J161/-5055	J1617-5055	47590 — 51434	1	0.0950	[181]
J1644-4559	B1641-45	42563 — 47888	3	0.206	[182, 183]
J1645-0317	B1642-03	40000 - 54000	7	0.183	[184]
J1646-4346	B1643-43	47913 — 55273	1	0.0496	本工作
J1702-4310	J1702-4310	51223 — 55461	1	0.0862	本工作
J1705-1906	B1702-19	43587 — 54935	1	0.0322	[95]
J1705-3423	J1705-3423	49086 — 54936	3	0.187	[95]
J1708-4009	1RXS J1708-4009	50826 - 54015	3	0.344	[185]
J1709-4429	B1706-44	47910 - 55507	4	0.192	本工作
J1718-3718	11718-3718	51383 - 55649	1	0.0856	[186]
J1718-3825	J1718-3825	50878 — 55507	1	0.0789	本工作
11720 1/22	D1717 1/	46710 54045	1	0.0444	[05]
J1/20-1633	B1/1/-16	46/18 - 54945	1	0.0444	[95]
J1/21-3532	B1/18-35	4/90/ - 54934	1	0.0520	[95]
J1/30-3350	B1/2/-33	4/880 - 54946	2	0.103	[95] + T //r
J1/31-4/44	B1/2/-4/	48184 — 55507	4	0.200	半 上作
J1739–2903	B1736-29	46270 — 54947	1	0.0421	[95]
J1740-3015	B1737-30	46270 — 55507	32	1.26	[95], 本工作
J1737-3137	J1737-3137	50759 — 54925	3	0.263	[95]
J1743-3150	B1740-31	47880 — 54926	1	0.0518	[95]
J1751-3323	J1751-3323	52496 — 54714	2	0.329	[94]
J1801-2451	B1757-24	48957 — 55507	5	0.279	本工作
J1801-0357	B1758-03	46719 — 54935	1	0.0444	[95]
J1801 - 2304	B1758-23	46694 - 55507	10	0.414	[95]. 本工作
J1803-2137	B1800-21	46270 - 55530	5	0.197	[95]、本工作
J1806-2125	J1806-2125	50802 - 54940	1	0.0883	[95]
J1809-1917	J1809-1917	50821 — 54939	1	0.0887	[95]
11800-2004	11809-2004	51510 - 54945	1	0.106	[05]
J1809 - 2004 J1812 - 1718	D1809-2004	31310 - 34943	2	0.100	[95]
J1012-1/10	D1009-175	40271 - 54930	1	0.120	[95]
J1815 - 1240 J1814 - 1744	J1813 - 1240 J1814 - 1744	54082 - 55220	1	0.071	[100]
J1014-1/44	J1014-1/44	50855 - 54945	1	0.444	[93]
J1818-1422	B1813-14	51512 — 54851	1	0.110	[94]
J1819-1458	J1819-1458	51031 — 54938	1	0.0935	[187]
J1824-1118	B1821-11	46612 — 54936	1	0.0439	[95]
J1824-2452	B1821-24	47800 — 52800	1	0.0730	[188]
J1825-0935	B1822-09	45008 — 54948	8	0.294	[95]
J1826-1334	B1823-13	46302 — 54944	5	0.211	[95]
J1833-0827	B1830-08	46449 — 54944	2	0.0860	[95]
J1830-1135	J1830-1135	51816 — 54945	1	0.117	[95]
J1834-0731	J1834-0731	51833 — 54945	1	0.117	[95]
J1835-1106	J1835-1106	49071 — 54940	1	0.0622	[95]
J1837-0559	J1837-0559	51153 — 54945	1	0.0963	[95]

表 3.5 续表

J名称	名称	范围 (MJD)	$N_{\rm g}$	$\dot{N}_{\rm g}$ (yr ⁻¹)	参考
I1838-0453	11838-0453	51251 - 54948	2	0 197	[95]
11841 - 0425	B1838_04	31231 - 54936	1	0.137	[95]
J1844_0538	B18/11_05	46270 - 54936	1	0.0421	[95]
11841 - 0456	1F 18/1 - 0.015	51224 - 53970	3	0.0421	[185]
11841 - 0430	118/1 = 052/	51224 - 53970 51816 - 54939	3	0.353	[05]
31041 0324	J1041 0524	51010 54757	0	0.001	[75]
J1845-0316	J1845-0316	51609 - 54942	2	0.219	[95]
I1846 - 0258	11846 - 0258	51574 - 54800	2	0.226	[189, 190]
J1847-0130	J1847 - 0130	52135 - 54942	2	0.260	[95]
J1851-0029	J1851-0029	53817 - 54948	1	0.323	[95]
J1853+0545	J1853+0545	52493 - 54830	1	0.313	[94]
01000 00 10	01000 00 10	02.00 0.000	-	0.010	[2]]
J1856+0113	B1853+01	47577 — 54948	1	0.0496	[95]
J1901+0156	B1859+01	46724 — 54936	1	0.0445	[95]
J1901+0716	B1859+07	46564 — 54938	1	0.0436	[95]
J1902+0615	B1900+06	44817 — 54938	5	0.180	[95]
J1909+0007	B1907+00	44818 — 54936	3	0.108	[95]
J1909+1102	B1907+10	52470 — 54821	2	0.311	[94]
J1910-0309	B1907-03	44817 — 54938	3	0.108	[95]
J1910+0358	B1907+03	47389 — 54936	1	0.0484	[95]
J1913+0446	J1913+0446	51832 — 54939	1	0.117	[95]
J1913+0832	J1913+0832	51643 — 54939	1	0.111	[95]
11012 1011	11012 1011	51465 54025	1	0.105	[05]
J1913 + 1011	J1913 + 1011	51465 - 54935	1	0.105	[95]
J1915 + 1009	B1913 + 10	45279 - 54948	1	0.0378	[95]
J1915 + 1606	B1913+16	466/1 - 54929	1	0.0442	[95]
J1919+0021	B1917+00	46001 - 54948	1	0.0408	[95]
J1926+0431	B1923+04	44819 — 54948	1	0.0360	[95]
11932 ± 2220	B1930 + 22	44816 — 54947	3	0.108	[95]
I1937 + 2544	B1935+22 B1935+25	46786 - 54937	1	0.0448	[95]
I1952 + 3252	B1951+32	47029 - 54945	5	0.231	[95]
11952 + 5059	B1953+50	43960 - 54938	2	0.0665	[95]
J1957 + 2831	J1957 + 2831	50239 - 54938	-3	0.233	[95]
			Ť	0.200	[/•]
J2021+3651	J2021+3651	52305 — 54948	2	0.276	[191,95]
J2022+3842	J2022+3842	54400 — 55500	1	0.332	[192]
J2116+1414	B2113+14	44329 — 54934	1	0.0344	[95]
J2225+6535	B2224+65	42000 — 54831	5	0.0569	[161,94]
J2229+6114	J2229+6114	51977 — 54946	3	0.369	[95]
J2257+5909	B2255+58	44817 — 54935	1	0.0361	[95]
J2301+5852	1E 2259+586	50356 - 52575	1	0.165	[193]
J2337+6151	B2334+61	52486 — 55045	1	0.143	[103]

录。

PSR J0537-6910已被发现在~7.6年中发生过23次跳变,其跳变发生率固此为~3.03 yr⁻¹。这是已知的跳变发生率最高的一颗脉冲星。第二颗跳变发生率高的脉冲星为PSR J1740-3015。在~25年当中,它发生了32次跳变,跳变发生率为~1.26 yr⁻¹。如图3.7中的子图b)所示,这两颗星的位置在P-P图上是非常不同的:PSR J0537-6910的脉冲周期P比PSR J1740-3015的小大约40倍左右,脉冲周期变化率中小大约一个量级。因而,这两颗星可能都比较年轻,特征年龄分别为5 kyr和20 kyr。PSR J1740-3015的磁场强度比PSR J0537-6910要高出一个量级。我们发现PSRs J0729-1448, J1341-6220和J0922+0638的跳变发生率也达到了每年一次以上。Parkes天文台在~20 yr中在PSR J1341-6220中发现了25次跳变。PSR J0729-1448在大约3.3年的数据段中有4次跳变记录。Shabanova (2010)在其大约一年的观测中在PSR J0922+0638中测到了一个跳变 [174],因此这颗星的高跳变发生率是很不确定的。在P-P图上,10³年和10⁵年的特征年龄线与10¹²G和10¹³G的偶极磁场线共同定义了一个区域,这个区域中的脉冲星表现出大跳变数目和高跳变发生率。

- 图3.7中的子图c)显示,比较大的相对幅度Δν_g/ν多出现于年轻长周期脉冲星中。最大的相对幅度(~3.3×10⁻⁵)出现在脉冲周期为3.38 s的PSR J1718-3718中 [186]。它的特征年龄只有34 kyr,而磁场高达7.4×10¹³ G,为强磁场射电脉冲星之一。在X射线波段观测到的超磁星也表现出相对幅度很大的跳变,超磁星的周期更长一些而且具有非常强的磁场。PSR J1048-5937和PSR J1841-0456均为在X射线波段发现的超磁星,它们已经遭受过相对幅度Δν_g/ν>10⁻⁵的跳变 [185,175]。由于相对幅度Δν_g/ν由绝对幅度Δν_g和脉冲频率ν共同决定,因而比较大的绝对幅度Δν_g应该出现在短周期的脉冲星中。图3.7中的子图d)确定了这一点。最大的绝对幅度出现在24-ms脉冲星PSR J2022+3842中。在它的MJD~54675跳变中,脉冲频率增加了大约78 μHz [192]。子图d)同时表明绝对幅度Δν_g与脉冲星特征年龄相关,年轻脉冲星倾向于具有大的跳变。不过,非常年轻的脉冲星(比如Crab脉冲星和PSR J1513-5908)并不表现出这一点。
- 图3.7中的子图e)表示了相对幅度的方均根值,即相对幅度的弥散的程度。两颗超磁星PSRs J1048-5937和J1841-0456表现出了范围很大的跳变尺度, Δνg/ν分布在从~1.4×10⁻⁶至~1.6×10⁻⁵。尽管Vela脉冲星的多

- 99 -

数跳变幅度相当,但是有两次小幅度跳变(图3.8)。于是,它的方均根 幅度相对较大。在两颗超磁星之后,较大的方均根值在两颗强磁场射电脉 冲星J1119-6127和J1838-0453中也有所出现。子图e)中似乎表现出较大的 幅度弥散倾向于发生在年老脉冲星当中。这种趋势似乎在子图f)中也有所 体现,其中方均根相对幅度为幅度均值所归一化,给出幅度的"调制因 子"。但是,应该注意的是,这个结论并不是非常确定,因为,只有很小 数目的跳变在PSR J1838-0453和其它的一些脉冲星中被观测到。子图f)表 现得比子图e)的弥散程度更大,比如Crab在子图f)中表现得更为显著,因 为它的幅度均值相对较小。

在图3.6中呈现的相对幅度的双峰分布暗示着可能存在两种导致跳变事件 的物理机制,一种产生大跳变(Δν_g/ν ~ 10⁻⁶),一种产生小跳变(Δν_g/ν ~ 10⁻⁹)。这一点被图3.8中呈现的跳变相对幅度序列所强化。特别是对于PSR J0835-4510和PSR J0537-6910,多数的跳变相对幅度相当,但是明显偏小的跳 变偶尔发生。尽管不像这两个例子这么清晰,这一点在其它脉冲星中也有所表 现,比如PSRs J1341-6220, J1740-3015, J0631+1036和J1801-2304。

在角动量转移模型当中,跳变被理解为旋转更快的星体内部的超流体向固态壳层传输额外的角动量(比如: Alpar et al. 1981 [111])。旋转超流体的角动 量由一个涡丝的集合所携带,每一根涡丝携带一个量子化的角动量单元。如果 超流体的转动在逐渐变慢,那么涡丝的面密度将连续降低,或者说涡丝在逐渐 向远离中子星自转轴的方向移动。但是,在中子星壳层当中的一部分中子超流 体倾向于钉扎在固体的晶格点阵上[195,196]。当由超流体与壳层之间的较差转 动产生的Magnus力超过了一定的阈值之后,大规模的像雪崩一样的去钉扎过程 将会被触发,导致角动量的大规模转移。

图3.7中的子图d)表明较大的跳变绝对幅度多出现在年轻的短周期脉冲星中。在子图c)中呈现的跳变相对幅度相对于脉冲星特征年龄表现出稍微均匀一些的分布。这些事实表明,在跳变事件中超流体所传输的角动量占超流体总角动量的一个相对固定的比例。换句话说,传输的角动量的多少与涡丝的面密度大概成一个正比例的关系。

以上发现的这些规律似乎只适用于特征年龄小于约5kyr的脉冲星。对于非常年轻的脉冲星,比如Crab,跳变往往发生得不很频繁而且幅度也比较小。 年轻中子星的内部温度可能比较高,使得涡丝的漂移可能会得到促进,这使 -100得壳层中的钉扎区的形成可能受到了抑制,从而不表现出非常活跃的跳变表现 [197]。Ruderman et al. (1998)论证说由于中子星内部核区的涡丝与磁流管之间的相互纠缠,随着中子星的转动减慢,磁流管被涡丝拉动向远离自转轴的方向运动 [108]。在这个过程中,移动的磁流管会使壳层中积累起更多的剪切力 [198]。当累积的剪切力超过了固体壳层所能承受的极限时,随后发生的壳层的破碎引发的星震会导致中子星的自转突然有一个小幅度的加速 [199]。这可能是在Crab, Vela以及PSR J1740-3015中观测到的小跳变的产生机制。

3.5.2 跳变恢复过程

伴随着跳变的发生,脉冲星表现出各种各样的后跳变计时行为。跳变时在 脉冲频率v和脉冲频率一阶导数v中所产生的阶跃的变化的一部分通常以指数的 形式恢复,并且在有些跳变之后会跟随多个指数恢复过程。在指数恢复过程之 后,在很多个跳变事件后,都已经发现脉冲频率一阶导数v会表现出一个线性的 增加,或者说是自转减慢率|v|表现出一个线性的减少。这种过程即为线性衰减 过程。在指数恢复与线性恢复过程结束之后,一次跳变通常会引起脉冲频率, 脉冲频率一阶导数甚至是脉冲频率的二阶导数有一个永久的变化。我们在工作 中,在所有的探测到的107次跳变中寻找了指数恢复与线性恢复过程。

我们发现在18颗脉冲星中的27次跳变过程中存在可以测量的指数衰减过程。绝大多数的指数恢复过程可以通过一个指数项来很好的描述。有两个跳变,其后的指数恢复过程被发现存在两个指数项的成分。这两个跳变分别是PSR J1119-6127中的跳变3和PSR J1803-2137中的跳变1。对于这两次跳变,较短时标的指数恢复的时间常数为12—15天。这个时间常数已经到了我们的观测采样所具备的探测指数衰减过程的下限。很有可能的是,更短时标的指数恢复过程

在图3.7中,我们将表征指数恢复过程的参数Q和τ_d表现在P – P图上。圆 形符号的尺寸表示了Q与τ_d的大小,决定方法与图3.7类似。对于出现多次指 数恢复过程的脉冲星,我们选择最大的Q或τ_d。如图所示,PSR J1119-6127显 示出与众不同的非常大的恢复比例(Q~0.84)。在所有其它情况中,Q值都 要小很多,典型的~0.01。但是,需要指出的是,比较大的Q值(0.6 – 1.0) 在Crab脉冲星中也有所表现[113,200]。同时,在超磁星中观测到的Q值也比较 大[185]。PSR J1119-6127,Crab脉冲星和超磁星都是很年轻的脉冲星,特征 年龄为几千年或更小一些。这可能暗示着Q与特征年龄存在较好的相关。而

– 101 –

由Lyne et al. (2000)以前所建议的Q与*i*的相关可能不是很明显 [113]。但是,从 我们样本中的其它指数恢复的参数来看Q与特征年龄的相关又并不很明显的存 在了。看起来似乎存在两类的跳变。一类表现出大Q值,像在非常年轻的脉冲 星中见到的那样。一类表现出小Q值,这一类出现在很多的脉冲星中,*i*和特征 年龄的分布都比较广。图3.9中的下图表示指数衰减时标τ_d。最长时标的302天 在PSR J1112–6103中被测到,最短时标的12天在PSR J1803–2137中测到。图中 似乎显示较长的时标倾向于出现在特征年龄为几十千年的脉冲星中。

为了进一步探索这些问题,图3.10给出了恢复比例Q与时间常数τ_d分别作 为跳变相对尺度Δν_g/ν与脉冲星特征年龄τ_d的函数的表示图。子图a)中表明, 具有比较大的恢复比例的指数衰减可以发生在具有很宽范围的相对尺度的跳 变事件当中。而且对于Q比较小的情况,我们并没有发现Q对于Δν_g/ν存在依 赖。子图b)确定了大的Q值发生在年轻的脉冲星当中,比如PSR J1119–6127。 而且相对较大的Q值被发现发生在了两个年龄比较大的脉冲星当中,PSRs J1052–5954和J1731–4744。另外,Lyne et al. (2000)强调在PSR B0525+21(τ_c ~ 1.5 Myr)的一次小跳变中,人们观测到了一个很大的Q值,达到大约0.5 [113]。 如此看来,似乎可以说,我们现在所观测到的大Q值,一方面可以在年轻脉冲 星中观测到,一方面可以在年老脉冲星中观测到。

在我们的工作中,我们发现的所有的指数恢复过程都跟随着相对尺度大 于10⁻⁷的跳变。如果在本征上小跳变的指数恢复过程的时标较短,那么可以导 致我们现在的观测事实。但是,图3.10中的子图c)表明对于上述的这种猜测没 有任何可靠的事实作为根据。于是,我们认为更有可能的是对于小跳变的指数 恢复过程探测的缺失,可能是一个综合的效应的结果,包括脉冲星本征的计时 噪声,TOA误差以及不充分的观测采样。子图d)几乎没有表现出时间常数_{7d}对 于脉冲星特征年龄有任何依赖关系,尽管似乎看起来,小_{7d}表现在年轻脉冲星 中。同样的结论也由Yuan et al. (2010)做出,他们使用了另外的一个样本,该样 本包括了Crab脉冲星 [94]。

现在我们已经很好的了解到,在跳变发生之后的长期的恢复过程由线性恢 复过程所主导,表现为脉冲频率一阶导数*i*的增加,或者说是自转减慢率|*i*|的 减少[113,99,94]。这个恢复过程已经表现在多数的*i*的测量中(见图3.5),特 别是对于大跳变。这种线性恢复过程通常从指数恢复过程结束之后开始表现的 显著,并且一直持续到下一次跳变的发生。对于一些跳变,指数衰减没有被观 测到或者是小*Q*值的指数衰减,比如在PSR J1301-6305中见到的跳变,线性恢

- 102 -



图 3.9 表现指数恢复过程恢复比例Q(上图)和时间常数 τ_{d} (下图)的 $P - \dot{P}$ 图。圆圈符 号的尺度与参数大小成线性关系。

- 103 -



图 3.10 指数恢复比例Q与跳变相对尺度 $\Delta \nu_{\rm g} / \nu$ (子图a)和时间常数 $\tau_{\rm d}$ (子图b)的比较。



图 3.10 指数恢复时间常数 τ_d 与跳变相对尺度 $\Delta \nu_g / \nu$ (子图c)和脉冲星特征年龄 τ_c (子图d)的比较。



图 3.11 线性衰减率 $\dot{\nu}$ 与自转减慢率 $|\dot{\nu}|$ 的比较。圆圈和三角形的符号分别表示正和负值。 实线相应于制动指数 $n = 3\pi\nu = 10$ Hz。

复过程在跳变发生之后立刻开始。我们为32颗脉冲星测量了跳变前,后或之间的脉冲频率二阶导数值*v*。这些测量的结果由表3.3给出,并且画在了图3.11中。 对于另外的4颗脉冲星,我们没有直接测量到*v*,这主要是因为数据段比较短。 在图3.11中,我们指示出108个*v*的测量值中存在11个负值。这主要是由于有些 脉冲星的计时噪声比较强,并且数据段比较短。

图3.11显示出线性恢复的比率与自转减慢率|*i*|之间存在很明显的相关。很明显的是这种线性恢复过程与中子星内部动力学和跳变过程的物理有直接的关系。首先,*i*/值在跳变发生前后经常变化。线性衰减斜率的变化的很明显的例子可以在Vela脉冲星,PSR J1420-6048,PSR J1709-4429中的跳变见到。在其它的一些例子中,比如PSRs J1301-6305和J1803-2137,这种斜率的变化不是非常显著。其次,观测到的脉冲频率二阶导数值往往比磁偶极辐射所导致的制动给出的*i*/要大。脉冲星制动通常由制动指数*n*来描述,其定义为

$$n = \frac{\nu \ddot{\nu}}{\dot{\nu}^2} \tag{3.5}$$

图3.11画出了一颗年轻脉冲星(*v* = 10 Hz)在制动指数为3时的*i*线。可以很清楚的看到,观测值比磁偶极给出的值要大很多。而且,人们发现观测到的制动指数*n*通常小于3.0 [201]。这就扩大了这种差距。

图3.12给出脉冲频率二阶导数在跳变发生时的变化Δ*ü*与自转减慢率|*i*|和跳-106-

变相对尺度Δν_g/ν的比较。对于有些情况,Δ^{*i*}可以通过拟合给出。但是,因 为拟合跳变参数时是局部拟合,这样相对较短的数据段并不能够给出比较好 的Δ^{*i*}值。因此,为了尽可能的得到准确的Δ^{*i*},并且扩大我们的样本,我们从 表3.3中取每一对^{*i*}的前/后跳变值,通过求差来得到Δ^{*i*}。在总共得到的66个值当 中有35个为正(53%),另外31个为负(47%)。这个结果显示正/负变化基本 相当。这与我们的预期是吻合的。图3.12的子图a)进一步显示脉冲频率二阶导数 的变化的幅度与^{*i*}本身的幅度相当。这意味着中子星内部的制动在跳变发生时存 在显著的变化。子图b)显示Δ^{*i*}对于跳变的相对幅度不存在明显的依赖,对于小 和大的跳变,^{*i*}均表现出在很大范围内的变化。因为大跳变经常发生在年轻脉冲 星当中,多数的这些年轻脉冲星的|*i*|比较大。所以,在具有比较大的相对幅度 的跳变当中发现大的脉冲频率二阶导数的变化是比较自然的。

如前所述,中子星的理论模型指出跳变事件的发生可能表明了中子星内部 "涡丝容性"区的存在,这些区域与正常的中子星转动脱耦,只有在跳变发生 时将角动量传递到壳层 [197,202,112]。除了"容性区",在中子星壳层中可能 还存在"涡丝阻性"区。在"阻性区"当中,涡丝通过连续的钉扎与去钉扎过 程将自身的角动量耦合到星体壳层上。跳变发生时,"阻性区"与壳层脱耦, 然后逐渐重新与壳层耦合。这个过程在跳变之后开始,一直延续到下次跳变发 生,导致了观测上表现出的指数与线性恢复过程。一个"阻性区"可能存在若 干子区域。我们的观测可以反映两个子区域。一个对应于中等时标的指数衰 减,相应的转动惯量记为*I*₁。一个对应于线性衰减,相应的转动惯量记为*I*₂。 我们观测到的恢复过程的长时标可能表明在上述两个子区域中钉扎都比较弱, 并且恢复过程可能在非线性相下 [203,112]。

跳变恢复理论指出线性恢复的比率,或者说是脉冲星内部制动所导致的*ü*_{int},正比于脉冲星自转减慢率|*i*|与跳变间隔时间*τ*_g的比值[112,204]:

$$\ddot{\nu}_{\rm int} = \frac{I_2}{I} \frac{|\dot{\nu}|}{\tau_{\rm g}} \tag{3.6}$$

其中I为中子星总转动惯量。我们通过表3.3可以对任一颗跳变脉冲星得到内部制动所导致的脉冲频率二阶导数*ü*int,或

$$\ddot{\nu}_{\rm int} = \ddot{\nu} - \frac{3\dot{\nu}^2}{\nu} \tag{3.7}$$

- 107 -



图 3.12 线性 $\dot{\nu}$ 恢复过程的比率的变化与自转减慢率 $|\dot{\nu}|$ (子图a)和跳变相对幅度 $\Delta \nu_{\rm g} / \nu$ (子图b)的比较。



图 3.13 跳变脉冲星内部制动导致的ü_{int}与自转减慢率|i|和跳变平均间隔时间< τ_g >之间 比值的比较。图中的直线为通过最小二乘法对数据进行的拟合。

通过表3.5可以得到任一跳变脉冲星发生跳变的平均间隔时间< τ_g >。于是在 图3.13中,我们将 $\ddot{\nu}_{int}$ 和 $\frac{|\dot{\nu}|}{\langle \tau_g \rangle}$ 进行了比较。可以很明显的看到这两者之间存在显 著的相关。通过作最小二乘法的拟合,我们发现

$$\ddot{\nu}_{\rm int} \approx 10^{-2.52} (\frac{|\dot{\nu}|}{<\tau_{\rm g}})^{0.99}$$
 (3.8)

这个观测得到的关系与Alpar et al. (1993)和Alpar & Baykal (2006)根据跳变中子 星内部制动预言的方程(3.6)非常的吻合,而且我们观测到的 $\frac{L_2}{I} \approx 10^{-2.52} \approx 0.003$ 与以前的观测结果保持一致 [112,204]。

结论

如果从观测的角度来总结这两项关于脉冲星的研究,那么或许可以说第 一项工作总结了29颗脉冲星类天体的X射线热谱并且为其建立固态夸克星的模 型。脉冲星类天体的X射线热谱可以比较好的运用黑体辐射谱来拟合,但是拟 合结果反映出的辐射区的尺度却往往小于典型中子星的半径。标准中子星冷却 模型并不预言观测到的冷却中子星已经足够老,使得星体表面的大部分区域的 热辐射不足以被观测到。夸克星具有与中子星截然不同的状态方程。小质量夸 克星的质量与星体半径的立方成正比。于是,夸克星为观测到的脉冲星类天体 的小半径提供了一种可能的理解途径。计算表明夸克星的热容量非常之小,使 得星体本身残留的热量并不足以支持观测到的中子星所表现出的热光度与冷却 过程。星体两极处的回流粒子将一部分的自转能量传导至星体内部转换为热 能,我们发现这部分客观的能量是固态夸克星在冷却过程中的重要的能量来 源。而且,根据这个过程所估计的脉冲星的转动惯量与小质量夸克星的前提假 设非常的吻合(见表2.3)。

在第二项工作,165颗脉冲星的总长度达到1911年的到达时数据被用于搜索 脉冲星脉冲周期跳变现象,共有107次跳变事件被探测到。这些跳变分布在36颗 南天射电脉冲星当中,其中有13颗在以前还没有被发现发生过跳变。有46次跳 变为新发现的事件,而另外61次在以前已经有所报道。由观测采样所限,我们 很难探测具有相对幅度Δνg/ν ≤ 10⁻⁹的跳变。因此历史上的22次跳变事件虽然 被我们的数据覆盖,但却无法测到。由于同样的原因,我们也很难探测到时 标τ_d短于20天的后跳变指数衰减。但是,我们的观测确实显示了在27次跳变之 后存在指数衰减过程。这些恢复过程分布在18颗脉冲星中,时标大体为几十天 至几百天。而且,我们在多数的跳变事件之后的长期的计时行为中观测到了脉 冲频率一阶导数i的线性增加。甚至对于很多脉冲星,我们在所测到的第一次跳 变之前的数据中也观测到了这种线性恢复过程,反映出从前次跳变事件的恢复 过程。我们一共测量了108个脉冲频率二阶导数值i (表3.3),有97个为期待中 的正值,11个为负值。这些负的i 比较普遍的来自于短的数据段和/或计时噪声 比较强的脉冲星。

在具有46次新的跳变事件的贡献下,相对幅度的双峰分布被进一步的确 认,可能寓意着存在两种导致跳变事件的机制,一个可能为星震过程,一个可 能为中子超流体的钉扎—去钉扎过程。指数恢复过程伴随着跳变事件的发生。

- 111 -

这种恢复过程可以发生在相对尺度小的跳变中,也可以发生在大跳变中,可以 发生在年轻脉冲星中,也可以发生在年老脉冲星中。具体来说,大的恢复比 例Q已经在年轻的Crab脉冲星的小跳变中发现,在年老脉冲星PSR B0525+21的 小跳变中也有发现。并且,人们在年轻脉冲星PSR J1119-6127的大跳变中也发 现了大的恢复比例。典型值为Q~0.01的小恢复比例的指数衰减表现得更为普 遍,特别是对于特征年龄为10³年至10⁵年的脉冲星。与恢复比例Q不同,恢复时 标_{7d}没有被观测到任何对于脉冲星特征年龄的依赖关系。我们发现具有跳变行 为脉冲星的脉冲频率二阶导数*v*与脉冲频率变化率|*v*|存在明显的相关,而且远 大于磁偶极辐射的预言。这体现了跳变脉冲星的制动由星体的内部制动主导, 同时与跳变现象有关 [204]。

由于观测当中存在的选择效应,跳变事件相对幅度的真实分布现在尚不为 人所知,现在所呈现的双峰分布的小跳变的一段并不很清楚。对于大多数的观 测项目来说,探测相对幅度为Δνg/ν ≤ 10⁻⁹的跳变通常已经非常接近探测能力 的极限。观测的采样和精度以及脉冲星本身的计时噪声同样阻碍了对于短时标 的指数恢复过程的探测。对于跳变现象的进一步研究需要规模更大和观测采样 间隔更短的计时观测,这样有利于对跳变脉冲星性质的研究与揭示跳变事件背 后的物理。

远不仅限于跳变现象,与脉冲星相关的研究课题非常广泛,比如:计时噪声,脉冲辐射特性,星际介质和引力波。特别是关于引力波,目前在国际上已经有北美,欧洲和澳大利亚三个探测引力波的实验小组。他们对一族毫秒脉冲星进行高精度计时观测,用观测得到的数据不断的限制引力波的强度。 而且,他们已经实现了数据共享,运用所能利用的最大量的数据寻找引力波的信号,现在已经比较接近对引力波的首次探测。可以应用于脉冲星天文学的下一代望远镜的研制目前在国际上也正在蓬勃的开展,以荷兰为中心覆盖整个欧洲的LOw Frequency ARray (LOFAR)项目正在建设当中。LOFAR目标使用一个很大的偶极振子阵关注30—240 MHz的低频射电信号。由于该项目覆盖欧洲很多区域,所以具有非常大的聚光面积,使得观测灵敏度大幅度的提高。脉冲星的射电流量密度在30—240 MHz范围内往往达到最大,因此LOFAR 具备发现大量目前未知脉冲星的能力,可以使河内脉冲星的已知种群数目得到大幅度提高。这对于研究脉冲星分布,银河系磁场等问题将非常有益。而且,LOFAR还将把目标放在河外星系,有望观测到第一颗存在于其它大型星系内的脉冲星。Square Kilometre Array (SKA)是一项旨在进行多方面研究的射 电望远镜阵列项目。SKA中央核心区的聚光面积将达到数个平方公里,另有 一个附属区域,距离核心区达数千公里。SKA的天线单元包括偶极振子和口 径15米的盘状天线,因而可以覆盖的频率达到100 MHz至10 GHz。在脉冲星方 面,SKA未来的巡天项目将使得已知脉冲星种群数量提高10倍,并且还可能发 现首个脉冲星—黑洞双星系统。SKA可能的选址包括澳大利亚西部和南非。在 西澳,Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP)目前正在建设当中, 将包括36个12米口径的盘状天线单元。ASKAP将不仅成为世界领先的望远镜设 备,而且还将为SKA的建设提供宝贵的经验。

我国的脉冲星观测也已经有比较好的开展。新疆天文台南山基地的25米口 径射电望远镜长期以来一直在对数百颗脉冲星进行常规计时观测。目前,新疆 天文台正在计划建设一架口径可能达百米的望远镜,聚光面积的增加将使得 观测灵敏度得到进一步提高。上海天文台的65米口径射电望远镜也正在开始展 开对于脉冲星的观测。云南天文台的40米口径望远镜已经初步具备了观测脉冲 星的能力。在贵州,世界最大的单体射电望远镜,Five-hundred-meter Aperture Spheroid Telescope (FAST),也正在建设中。这个类似于Arecibo望远镜的设备 在未来将成为世界脉冲星天文学发展的一支重要力量。

参考文献

- Zavlin V. E., Trümper J., Pavlov G. G. X-ray emission from the radio-quiet neutron star in Puppis A[J]. ApJ. 1999, 525:959
- [2] Xu R. X. [J]. ApJ. 2005, 356:359
- [3] Becker W., Aschenbach B. [C]. W. Becker, H. Lesch, Trümper, (Editors) WEHeraeus Seminar on Neutron Stars, Pulsars and Supernova Remnants, BadHonnef. 2002, 64
- [4] A. G. Lyne, F. Graham-Smith. Pulsar Astronomy[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006
- [5] A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, R. A. Collins. Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source[J]. Nature. 1968, 217:709–713
- [6] F. Pacini. Energy emission from a neutron star[J]. Nature. 1967, 216:567-568
- [7] M. I. Large, A. E. Vaughan, B. Y. Mills. A pulsar supernova association[J]. Nature. 1968, 220:340–341
- [8] D. H. Staelin, E. C. Reifenstein, III. Pulsating radio sources near the Crab Nebula[J]. Science. 1968, 162:1481–1483
- [9] D. W. Richards, J. M. Comella. The period of pulsar NP 0532[J]. Nature. 1969, 222:551–552
- [10] D. W. Melzer, K. S. Thorne. Normal modes of radial pulsation of stars at the end-point of thermo nuclear evolution[J]. ApJ. 1966, 145:514–543
- [11] T. Gold. Rotating Neutron Stars as the Origin of the Pulsating Radio Sources[J]. Nature. 1968, 218:731–732
- [12] F. Pacini. Rotating Neutron Stars, Pulsars, and Supernova Remnants[J]. Nature. 1968, 219:145–146
- [13] T. Gold. Rotating neutron stars and the nature of pulsars[J]. Nature. 1969, 221:25-27
- [14] V. Radhakrishnan, R. N. Manchester. Detection of a change of state in the pulsar PSR 0833-45[J]. Nature. 1969, 222:228
- [15] P. E. Reichley, G. S. Downs. Observed decrease in the periods of pulsar PSR 0833-45[J]. Nature. 1969, 222:229
- [16] J. P. Ostriker. Possible model for a rapidly pulsating radio source[J]. Nature. 1968, 217:1227– 1228

- [17] F. Pacini, E. E. Salpeter. Some models for pulsed radio sources[J]. Nature. 1968, 218:733– 734
- [18] P. Ghosh. Rotation and Accretion Powered Pulsars[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2007
- [19] R. Giaconni, H. Gursky, E. Kellogg, E. Schreier, H. Tananbaum. Discovery of periodic X-ray pulsations in Centaurus X-3 from UHURU[J]. ApJ. 1971, 167:L67–L73
- [20] H. Tananbaum, H. Gursky, E. M. Kellogg, R. Levinson, E. Schreier, R. Giacconi. Discovery of a periodic pulsating binary X-ray source in Hercules from Uhuru[J]. ApJ. 2007, 174:L143
- [21] E. A. Boldt, U. D. Desai, S. S. Holt, P. J. Serlemitsos, R. F. Silverberg. Pulsed X-ray emission of NP 0532 in March 1968[J]. Nature. 1969, 223:280–281
- [22] G. J. Fishman, F. R. Harnden, R. C. Haymes. Observation of pulsed hard X-radiation from NP 0532 from 1967 data[J]. ApJ. 1969, 156:L107–L110
- [23] P. Goldreich, W. H. Julian. Pulsar electrodynamics[J]. ApJ. 1969, 157:869-880
- [24] P. B. Demorest, T. Pennucci, S. M. Ransom, M. S. E. Roberts, J. W. T. Hessels. A two-solarmass neutron star measured using Shapiro delay[J]. Nature. Oct. 2010, 467:1081–1083. 1010.5788
- [25] D. G. Yakovlev, C. J. Pethick. Neutron Star Cooling[J]. ARAA. 2004, 42:169
- [26] Yakovlev D. G., Gnedin O. Y., Kaminker A. D., Potekhin A. Y. [C]. AIPC. 2008, vol. 983, 379
- [27] Xu R. X. [J]. J Phys G: Nucl Part Phys. 2009, 36:064010
- [28] Xu R. X. [J]. ApJ. 2003, 596:L59
- [29] Horvath J. [J]. Mod Phys Lett. 2005, A20:2799
- [30] Owen B. J. [J]. Phys Rev Lett. 2005, 95:211101
- [31] Mannarell M., Rajagopal K., Shama R. [J]. Phys Rev D. 2007, 76:4026
- [32] Shuyak E. V. [J]. Prog Part Nucl Phys. 2009, 62:48
- [33] Hui C. Y., Becker W. [J]. A&A. 2006, 454:543
- [34] Pavlov G. G., Zavlin V. E., Sanwal D., Trümper J. 1E 1207.4-5209: The Puzzling Pulsar at the Center of the Supernova Remnant PKS 1209-51/52[J]. ApJ. 2002, 569:L95

- 116 -

- [35] G. L. Israel, S. Mereghetti, L. Stella. The discovery of 8.7 second pulsations from the ultrasoft X-ray source 4U 0142+61[J]. ApJ. 1994, 433:L25
- [36] S. Mereghetti, L. Stella. The very low mass X-ray binary pulsars: A new class of sources ?[J]. ApJ. 1995, 442:L17
- [37] E. P. Mazets, S. V. Golenetskii, Yu. A. Gur'yan. Soft gamma-ray bursts from the source B1900+14[J]. Sov Astron Lett. 1979, 5:343
- [38] J.-L. Atteia, M. Boer, K. Hurley, M. Niel, G. Vedrenne, E.E. Fenimore, R.W. Klebesadel, J.G. Laros, A.V. Kuznetsov, R.A. Sunyaev, O.V. Terekhov, C. Kouveliotou, T. Cline, B. Dennis, U. Desai, L. Orwig. Localization, time histories, and energy spectra of a new type of recurrent high-energy transient source[J]. ApJ. 1987, **320**:L105
- [39] P. M. Woods, C. Thompson. Soft gamma repeaters and anomalous X-ray pulsars: magnetar candidates[C]. Compact stellar X-ray sources. 2006, 547
- [40] C. Thompson, R. C. Duncan. New Constraints on the Structure and Evolution of the Pulsar Wind Nebula 3C 58[J]. ApJ. 1996, 473:322
- [41] Haberl F. AXPs and X-ray-dim isolated neutron stars: recent XMM-Newton and Chandra results[J]. Adv Space Res. 2004, 33:638
- [42] G. G. Pavlov, D. Sanwal, M. A. Teter. [C]. F. Camilo, B. M. Gaensler, (Editors) IAU Symposium on Young Neutron Stars and their Environments, Central Compact Objects in Supernova Remnants, San Francisco. 2004, vol. 218, 239
- [43] Weisskopf M. C., O'Dell S. L., Paerels F., Elsner R. F., Becker W., Tennant A. F., Swartz D. A. Chandra Phase-Resolved X-ray Spectroscopy of the Crab Pulsar[J]. 2004. 2004, 601:1050
- [44] W. Zhu, V. M. Kaspi, M. E. Gonzalez, A. G. Lyne. Xmm-Newton X-Ray Detection of the High-Magnetic-Field Radio Pulsar PSR B1916+14[J]. ApJ. 2009, 704:1321
- [45] P. Slane, D. J. Helfand, E. van der Swaluw, S. S. Murray. New Constraints on the Structure and Evolution of the Pulsar Wind Nebula 3C 58[J]. ApJ. 2004, 616:403
- [46] M. E. Gonzalez, V. M. Kaspi, F. Camilo, B. M. Gaensler, M. J. Pivovaroff. Unusual Pulsed X-Ray Emission from the Young, High Magnetic Field Pulsar PSR J1119-6127[J]. ApJ. 2005, 630:489
- [47] V. E. Zavlin. First X-Ray Observations of the Young Pulsar J1357-6429[J]. ApJL. 2007, 665:L143

- [48] J. P. Halpern, E. V. Gotthelf, F. Camilo, D. J. Helfand, S. M. Ransom. X-Ray, Radio, and Optical Observations of the Putative Pulsar in the Supernova Remnant CTA 1[J]. ApJ. 2004, 612:398
- [49] A. Manzali, A. De Luca, P. A. Caraveo. Phase-resolved Spectroscopy of the Vela Pulsar with XMM-Newton[J]. ApJ. 2007, 669:570
- [50] K. E. McGowan, S. Zane, M. Cropper, J. A. Kennea, F. A. Córdova, C. Ho, T. Sasseen, W. T. Vestrand. XMM-Newton observations of PSR B1706–44[J]. ApJ. 2004, 600:343
- [51] G. G. Pavlov, O. Kargaltsev, W. F. Brisken. Chandra Observation of PSR B1823-13 and Its Pulsar Wind Nebula[J]. ApJ. 2008, 675:683
- [52] K. E. McGowan, J. A. Kenea, S. Zane, F. A. Cordova, M. Cropper, C. Ho, T. Sasseen, W. T. Vestrand. Detetion of pulsed X-ray emission from XMM-Newton observations of PSR J0538+2817[J]. ApJ. 2003, 591:380
- [53] K. E. McGowan, S. Zane, M. Cropper, W. T. Vestrand, C. Ho. Evidence for Surface Cooling Emission in the XMM-Newton Spectrum of the X-Ray Pulsar PSR B2334+61[J]. ApJ. 2006, 639:377
- [54] Possenti A., Mereghetti S., Colpi M. [J]. A&A. 1996, 313:565
- [55] A. De Luca, P. A. Caraveo, S. Mereghetti, M. Negroni, G. F. Bignami. On the Polar Caps of the Three Musketeers[J]. ApJ. 2005, 623:1051
- [56] M. S. Jackson, J. P. Halpern. A refined ephemeris and phase-resolved X-ray spectroscopy of the Geminga pulsar[J]. ApJ. 2005, 633:1114
- [57] Zavlin V. E., Pavlov G. G. [J]. ApJ. 2004, 616:452
- [58] A. De Luca, S. Mereghetti, P. A. Caraveo, M. Moroni, R. P. Mignani, G. F. Bignami. XMM-Newton and VLT observations of the isolated neutron star 1E1207.4-5209[J]. A&A. 2004, 418:625
- [59] D. Chakrabarty, M. J. Pivovaroff, L. E. Hernquist, J. S. Heyl, R. Narayan. The Central X-Ray Point Source in Cassiopeia A[J]. ApJ. 2001, 548:800
- [60] O. Kargaltsev, G. G. Pavlov, D. Sanwal, G. P. Garmire. The Compact Central Object in the Supernova Remnant G266.2-1.2[J]. ApJ. 2002, 580:1060
- [61] E. V. Gotthelf, J. P. Halpern, F. D. Seward. Discovery of a 105 ms X-Ray Pulsar in Kesteven
 79: On the Nature of Compact Central Objects in Supernova Remnants[J]. ApJ. 2005,
 627:390

- 118 -

- [62] Ho W. C. G., Kaplan D. L., Chang P., Van Adelsberg M., Potekhin A. Y. [J]. MNRAS. 2007, 375:821
- [63] D. L. Kaplan, M. H. van Kerkwijk, H. L. Marshall, B. A. Jacoby, S. R. Kulkarni, D. A. Frail. The Nearby Neutron Star RX J0720.4–3125 from Radio to X-Rays[J]. ApJ. 2003, 590:1008
- [64] F. Haberl, W. Pietsch, C. Motch. RX J0420.0-5022: an isolated neutron star candidate with evidence for 22.7 s X-ray pulsations[J]. A&A. 1999, 351:L53
- [65] Haberl F., Zavlin V. E. XMM-Newton observations of the isolated neutron star RX J0806.4-4123[J]. A&A. 2002, 391:571
- [66] Becker W., Trümper J. The X-ray luminosity of rotation-powered neutron stars[J]. A&A. 1997, **326**:682
- [67] Xu R. X. [J]. Int J Mod Phys. 2010, D19:1437
- [68] Madsen J. [C]. Hadrons in Dense Matter and Hadrosynthesis, Springer, Berlin. 1999, vol. 162
- [69] Xu R. X., Qiao G. J. [J]. Chin Phys Lett. 1999, 16:778
- [70] Alcock C., Farhi E., Olinto A. [J]. ApJ. 1986, 310:216
- [71] Usov V. V. [J]. ApJ. 2001, 550:L179
- [72] Itoh N., Adachi T., Nakagawa M., Kohyama Y., Munakata H. [J]. ApJ. 1989, 339:354
- [73] Zhang X., Xu R. X., Zhang S. N. [C]. F. Camilo, B. M. Gaensler, (Editors) IAU Symposium on Young Neutron Stars and their Environments, San Francisco. 2004, vol. 218, 303
- [74] Michel F. C. Neutron star disk formation from supernova fall-back and possible observational consequences[J]. Phys Rev Lett. 1988, 60:677
- [75] Zhu W. W., Xu R. X. [J]. 2004. arXiv:astro-ph/0410265
- [76] Cheng A. F., Ruderman M. A. Bunching mechanism for coherent curvature radiation in pulsar magnetospheres[J]. ApJ. 1977, 214:598
- [77] Arons J. Pair Creation Above Pulsar Polar Caps Steady Flow in the Surface Acceleration Zone and Polar Cap X-ray Emission[J]. ApJ. 1981, 248:1099
- [78] Wang F. Y. H., Ruderman M. A., Halpern J. P., Zhu T. [J]. ApJ. 1998, 498:373
- [79] Zhang B., Harding A. K. High Magnetic Field Pulsars and Magnetars: A Unified Picture[J]. ApJ. 2000, 532:1150

- [80] Flowers E., Itoh N. [J]. ApJ. 1981, 250:750
- [81] Lipunov V. M. Astrophysics of Neutron Stars[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992
- [82] Pavlov G. G., Luna G. J. M. [J]. ApJ. 2009, 703:910
- [83] D. J. Thompson, A. K. Harding, W. Hermsen, M. P. Ulmer. Gamma-Ray Pulsars: The Compton Observatory Contribution to the Study of Isolated Neutron Stars[C]. C. D. Dermer, M. S. Strickman, J. D. Kurfess, (Editors) AIP Conf. Proc. 410: Proceedings of the Fourth Compton Symposium. 1997, 39
- [84] Fesen R. A., Pavlov G. G., Sanwal D. [J]. ApJ. 2006, 636:848
- [85] J. P. Halpern, E. V. Gotthelf, F. Camilo, F. D. Seward. X-Ray Timing of PSR J1852+0040 in Kesteven 79: Evidence of Neutron Stars Weakly Magnetized at Birth[J]. ApJ. 2007, 665:1304
- [86] Mereghetti S. [J]. ARAA. 2008, 15:225
- [87] Lo Curto G., Mignani R. P., Perna R., Israel G. L. [J]. A&A. 2007, 473:539
- [88] M. Kramer, I. H. Stairs, R. N. Manchester, M. A. McLaughlin, A. G. Lyne, R. D. Ferdman, M. Burgay, D. R. Lorimer, A. Possenti, N. D'Amico, J. M. Sarkissian, G. B. Hobbs, J. E. Reynolds, P. C. C. Freire, F. Camilo. Tests of General Relativity from Timing the Double Pulsar[J]. Science. 2006, **314**:97
- [89] D. R. B. Yardley, W. A. Coles, G. B. Hobbs, J. P. W. Verbiest, R. N. Manchester, W. van Straten, F. A. Jenet, M. Bailes, N. D. R. Bhat, S. Burke-Spolaor, D. J. Champion, A. W. Hotan, S. Oslowski, J. E. Reynolds, J. M. Sarkissian. On detection of the stochastic gravitational-wave background using the Parkes pulsar timing array[J]. MNRAS. 2011:491
- [90] G. Hobbs, W. Coles, R. Manchester, D. Chen. Developing a pulsar-based timescale[J]. ArXiv e-prints (astro-ph/10115285). 2010
- [91] R. N. Manchester. [J]. ArXiv e-prints (astro-ph/11015202). 2011
- [92] G. Hobbs, A. G. Lyne, M. Kramer. An analysis of the timing irregularities for 366 pulsars[J]. MNRAS. 2010, 402:1027
- [93] G. S. Downs. JPL pulsar timing observations. I. The Vela pulsar[J]. ApJ. 1981, 249:687-697
- [94] J. P. Yuan, N. Wang, R. N. Manchester, Z. Y. Liu. 29 glitches detected at Urumqi Observatory[J]. MNRAS. 2010a, 404:289
- [95] C. M. Espinoza, A. G. Lyne, B. W. Stappers, M. Kramer. A study of 315 glitches in the rotation of 102 pulsars[J]. MNRAS. 2011, 414:1679

- 120 -

- [96] R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, M. Hobbs. The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue[J]. AJ. 2005, 129:1993
- [97] P. M. Woods, V. M. Kaspi, C. Thompson, F. P. Gavriil, H. L. Marshall, D. Chakrabarty, K. Flanagan, J. Heyl, L. Hernquist. Changes in the X-Ray Emission from the Magnetar Candidate 1E 2259+586 during Its 2002 Outburst[J]. ApJ. 2004, 605:378
- [98] R. Dib, V. M. Kaspi, F. P. Gavriil, P. M. Woods. Glitch and pulsed flux increase in Anomalous X-ray Pulsar 1E 1048.1-5937[J]. The Astronomer's Telegram. 2007, 1041:1
- [99] Wang N., Manchester R. N., Pace R. T., Bailes M., Kaspi V. M., Stappers B. W., Lyne A. G. Glitches in Southern Pulsars[J]. MNRAS. 2000, 317:843
- [100] A. G. Lyne, F. Graham-Smith, R. S. Pritchard. Spin-up and Recovery in the 1989 Crab Pulsar Glitch[J]. Nature. 1992, 359:706
- [101] Dodson R. G., McCulloch P. M., Lewis D. R. High time resolution observations of the January 2000 glitch in the Vela pulsar[J]. ApJL. 2002, 564:85–88
- [102] McCulloch P. M., Hamilton P. A., McConnell D., King E. A. The Vela glitch of Christmas 1988[J]. Nature. 1990, 346:822–824
- [103] J. P. Yuan, R. N. Manchester, N. Wang, X. Zhou, Z. Y. Liu, Z. F. Gao. A very large glitch in PSR B2334+61[J]. ApJ. 2010b, 719:L111
- [104] W. Z. Zou, N. Wang, H. X. Wang, R. N. Manchester, X. J. Wu, J. Zhang. Unusual glitch behaviours of two young pulsars[J]. MNRAS. 2004, 354:811
- [105] T. V. Shabanova. Observations of three slow glitches in the spin rate of the pulsar B1822-09[J]. MNRAS. 2005, 356:1435
- [106] T. V. Shabanova. Slow glitches in the pulsar B1822-09[J]. APSS. 2007, 308:591
- [107] M. Ruderman. Neutron Star Crustal Plate Tectonics. III. Cracking, Glitches and Gamma-Ray Bursts[J]. ApJ. 1991, 382:587
- [108] M. Ruderman, T. Zhu, K. Chen. Neutron star magnetic field evolution, crust movement, and glitches[J]. ApJ. 1998, 492:267
- [109] P. W. Anderson, N. Itoh. Pulsar glitches and restlessness as a hard superfluidity phenomenon[J]. Nature. 1975, 256:25
- [110] M. Ruderman. Crust-breaking by neutron superfluids and the Vela pulsar glitches[J]. ApJ. 1976, 203:213

- [111] M. A. Alpar, P. W. Anderson, D. Pines, J. Shaham. Giant glitches and the pinned vorticity in the Vela and other pulsars[J]. ApJ. 1981, 249:L29
- [112] M. A. Alpar, H. F. Chau, K. S. Cheng, D. Pines. Postglitch relaxation of the Vela pulsar after its first eight glitches: A reevaluation with the vortex creep model[J]. ApJ. 1993, 409:345
- [113] A. G. Lyne, S. L. Shemar, F. Graham-Smith. Statistical Studies of Pulsar Glitches[J]. MN-RAS. 2000, 315:534
- [114] A. Melatos, C. Peralta, J. S. B. Wyithe. Avalanche Dynamics of Radio Pulsar Glitches[J]. ApJ. 2008, 672:1103
- [115] L. Staveley-Smith, W. E. Wilson, T. S. Bird, M. J. Disney, R. D. Ekers, K. C. Freeman, R. F. Haynes, M. W. Sinclair, R. A. Vaile, R. L. Webster, A. E. Wright. The Parkes 21 cm Multibeam Receiver[J]. PASA. 1996, 13:243
- [116] R. N. Manchester, A. G. Lyne, F. Camilo, J. F. Bell, V. M. Kaspi, N. D'Amico, N. P. F. McKay, F. Crawford, I. H. Stairs, A. Possenti, D. J. Morris, D. C. Sheppard. The Parkes multi-beam pulsar survey I. Observing and data analysis systems, discovery and timing of 100 pulsars[J]. MNRAS. 2001, 328:17
- [117] D. A. Smith, L. Guillemot, F. Camilo, I. Cognard, D. Dumora, C. Espinoza, P. C. C. Freire, E. V. Gotthelf, et al. Pulsar timing for the Fermi gamma-ray space telescope[J]. A&A. 2008, 492:923
- [118] P. Weltevrede, S. Johnston, R. N. Manchester, R. Bhat, M. Burgay, D. Champion, G. B. Hobbs, B. Kızıltan, M. Keith, A. Possenti, J. E. Reynolds, K. Watters. Pulsar Timing with the Parkes Radio Telescope for the Fermi Mission[J]. PASA. 2010, 27:64–75
- [119] G. Hobbs, R. Hollow, D. Champion, J. Khoo, et al. The PULSE@Parkes Project: a New Observing Technique for Long-Term Pulsar Monitoring[J]. PASA. 2009, 26:468–475
- [120] G. Hobbs, D. Miller, R. N. Manchester, J. Dempsey, J. M. Chapman, J. Khoo, J. Applegate, M. Bailes, et al. The Parkes Observatory Pulsar Data Archive[J]. PASA. Aug. 2011, 28:202– 214. 1105.5746
- [121] A. W. Hotan, W. van Straten, R. N. Manchester. PSRCHIVE and PSRFITS: An Open Approach to Radio Pulsar Data Storage and Analysis[J]. PASA. 2004, 21:302
- [122] G. B. Hobbs, R. T. Edwards, R. N. Manchester. TEMPO2, a new pulsar-timing package I. An overview[J]. MNRAS. 2006, 369:655
- [123] R. T. Edwards, G. B. Hobbs, R. N. Manchester. TEMPO2, a new pulsar timing package II. The timing model and precision estimates[J]. MNRAS. 2006, 372:1549

- 122 -

- [124] E. M. Standish. JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405, Memo IOM 312.F-98-048[M]. Pasadena: JPL, 1998. Http://ssd.jpl.nasa.gov/iaucomm4/de405iom/de405iom.pdf
- [125] W. Coles, G. Hobbs, D. J. Champion, R. N. Manchester, J. P. W. Verbiest. Pulsar timing analysis in the presence of correlated noise[J]. MNRAS. Nov. 2011, 418:561–570. 1107. 5366
- [126] D. J. Morris, G. Hobbs, A. G. Lyne, I. H. Stairs, F. Camilo, R. N. Manchester, A. Possenti, J. F. Bell, V. M. Kaspi, N. D. Amico, N. P. F. McKay, F. Crawford, M. Kramer. The Parkes Multibeam Pulsar Survey - II. Discovery and timing of 120 pulsars[J]. MNRAS. 2002, 335:275
- [127] G. Hobbs, A. G. Lyne, M. Kramer, C. E. Martin, C. Jordan. Long-term timing observations of 374 pulsars[J]. MNRAS. 2004, 353:1311
- [128] E. B. Fomalont, W. M. Goss, R. N. Manchester, A. G. Lyne. Improved proper motions for pulsars from VLA observations[J]. MNRAS. 1997, 286:81
- [129] R. Dodson, D. Legge, J. E. Reynolds, P. M. McCulloch. The Vela Pulsar's Proper Motion and Parallax Derived from VLBI Observations[J]. ApJ. 2003, 596:1137
- [130] G. Hobbs, A. Faulkner, I. H. Stairs, F. Camilo, R. N. Manchester, A. G. Lyne, M. Kramer, N. D'Amico, V. M. Kaspi, A. Possenti, M. A. McLaughlin, D. R. Lorimer, M. Burgay, B. C. Joshi, F. Crawford. The Parkes multibeam pulsar survey - IV. Discovery of 180 pulsars and parameters for 281 previously known pulsars[J]. MNRAS. 2004, **352**:1439
- [131] M. Kramer, J. F. Bell, R. N. Manchester, A. G. Lyne, F. Camilo, I. H. Stairs, N. D'Amico, V. M. Kaspi, G. Hobbs, D. J. Morris, F. Crawford, A. Possenti, B. C. Joshi, M. A. McLaughlin, D. R. Lorimer, A. J. Faulkner. The Parkes Multibeam Pulsar Survey III. Young pulsars and the discovery and timing of 200 pulsars[J]. MNRAS. 2003, 342:1299
- [132] F. Camilo, V. M. Kaspi, A. G. Lyne, R. N. Manchester, J. F. Bell, N. D'Amico, N. P. F. McKay, F. Crawford. Discovery of two high-magnetic-field radio pulsars[J]. ApJ. 2000, 541:367
- [133] N. D'Amico, V. M. Kaspi, R. N. Manchester, F. Camilo, A. G. Lyne, A. Possenti, I. H. Stairs, M. Kramer, F. Crawford, J. Bell, N. P. F. McKay. Two young radio pulsars coincident with EGRET sources[J]. ApJ. 2001, 552:L45
- [134] D. A. Frail, S. R. Kulkarni, G. Vasisht. Identification of PSR 1758–23 as a runaway pulsar from the supernova remnant W 28[J]. Nature. 1993, 365:136

- [135] B. R. Zeiger, W. F. Brisken, S. Chatterjee, W. M. Goss. Proper Motions of PSRs B1757-24 and B1951+32: Implications for Ages and Associations[J]. ApJ. 2008, 674:271
- [136] W. F. Brisken, M. Carrillo-Barragán, S. Kurtz, J. P. Finley. Proper Motion of Pulsar B1800-21[J]. ApJ. 2006, 652:554
- [137] F. D'Alessandro, P. M. McCulloch, E. A. King, P. A. Hamilton, D. McConnell. Timing Observations of Southern Pulsars — 1987 to 1991[J]. MNRAS. 1993, 261:883–894
- [138] G. H. Janssen, B. W. Stappers. 30 glitches in slow pulsars[J]. A&A. 2006, 457:611-618
- [139] C. Flanagan. PSR 0833-45[J]. IAU Circ. 1996, 6491:2
- [140] R. G. Dodson, P. M. McCulloch, M. E. Costa. PSR 0833-45[J]. IAU Circ. 2000, 7347:2
- [141] R. Dodson, S. Buchner, B. Reid, D. Lewis, C. Flanagan. PSR 0833-45[J]. IAU Circ. 2004, 8370:4
- [142] C. S. Flanagan, S. J. Buchner. PSR 0833-45[J]. CBET. 2006, 595:1
- [143] R. N. Manchester, A. G. Lyne, N. D'Amico, M. Bailes, S. Johnston, D. R. Lorimer, P. A. Harrison, L. Nicastro, J. F. Bell. The Parkes Southern Pulsar Survey I. Observing and data analysis systems and initial results[J]. MNRAS. 1996, 279:1235–1250
- [144] F. Camilo, J. F. Bell, R. N. Manchester, A. G. Lyne, A. Possenti, M. Kramer, V. M. Kaspi, I. H. Stairs, N. D'Amico, G. Hobbs, E. V. Gotthelf, B. M. Gaensler. PSR J1016-5857: A Young Radio Pulsar with Possible Supernova Remnant, X-Ray, and Gamma-Ray Associations[J]. ApJ. 2001, 557:L51–L55
- [145] S. Johnston, A. G. Lyne, R. N. Manchester, D. A. Kniffen, N. D'Amico, J. Lim, M. Ashworth. A High Frequency Survey of the Southern Galactic Plane for Pulsars[J]. MNRAS. 1992, 255:401–411
- [146] J. O. Urama. Glitch monitoring in PSRs B1046-58 and B1737-30[J]. MNRAS. 2002, 330:58
- [147] V. M. Kaspi, J. R. Lackey, J. Mattox, R. N. Manchester, M. Bailes, R. Pace. High-Energy Gamma-Ray Observations of Two Young, Energetic Radio Pulsars[J]. ApJ. 2000, 528:445– 453
- [148] The Fermi-LAT Collaboration. Fermi Large Area Telescope Second Source Catalog[J]. ArXiv e-prints. Aug. 2011. 1108.1435
- [149] F. Crawford, B. M. Gaensler, V. M. Kaspi, R. N. Manchester, F. Camilo, A. G. Lyne, M. J. Pivovaroff. A radio supernova remnant associated with the young pulsar J1119–6127[J]. ApJ. 2001, 554:152–160

- 124 -
- [150] P. Weltevrede, S. Johnston, C. M. Espinoza. The glitch-induced identity changes of PSR J1119-6127[J]. MNRAS. oct 2011, 411:1917–1934
- [151] V. M. Kaspi, R. N. Manchester, S. Johnston, A. G. Lyne, N. D'Amico. PSR J1341–6220: A young pulsar in a supernova remnant[J]. ApJ. 1992, **399**:L155–L157
- [152] M. I. Large, A. E. Vaughan, R. Wielebinski. Highly Dispersed Pulsar and Three Others[J]. Nature. 1969, 223:1249–1250
- [153] W. B. McAdam, J. L. Osborne, M. L. Parkinson. A supernova remnant associated with the young gamma-ray pulsar PSR 1706-44[J]. Nature. 1993, 361:516–518
- [154] S. Johnston, R. N. Manchester, A. G. Lyne, V. M. Kaspi, N. D'Amico. Timing measurements for 45 pulsars[J]. A&A. 1995, 293:795–802
- [155] M. I. Large, A. E. Vaughan, R. Wielebinski. Pulsar Searches at the Molonglo Radio Observatory[J]. Nature. 1968, 220:753–756
- [156] F. D'Alessandro, P. M. McCulloch. Long-term timing observations of four southern pulsars[J]. MNRAS. 1997, 292:879–886
- [157] T. R. Clifton, A. G. Lyne. High-radio-frequency survey for young and millisecond pulsars[J]. Nature. 1986, 320:43–45
- [158] A. Krawczyk, A. G. Lyne, J. A. Gil, B. C. Joshi. Observations of 14 pulsar glitches[J]. MNRAS. 2003, 340:1087
- [159] W. Z. Zou, N. Wang, R. N. Manchester, J. O. Urama, G. Hobbs, Z. Y. Liu, J. P. Yuan. Observations of six glitches in PSR B1737-30[J]. MNRAS. Mar. 2008, 384:1063–1068. arXiv:0711.1196
- [160] V. M. Kaspi, A. G. Lyne, R. N. Manchester, S. Johnston, N. D'Amico, S. L. Shemar. A young glitching pulsar near the direction of W28[J]. ApJ. 1993, 409:L57–L60
- [161] S. L. Shemar, A. G. Lyne. Observations of pulsar glitches[J]. MNRAS. 1996, 282:677–690
- [162] D. A. Frail, S. R. Kulkarni. Unusual interaction of the high–velocity pulsar PSR 1757–24 with the supernova remnant G5.4–1.2[J]. Nature. 1991, 352:785–787
- [163] A. G. Lyne, V. M. Kaspi, M. Bailes, R. N. Manchester, H. Taylor, Z. Arzoumanian. A Giant Glitch in PSR B1757–24[J]. MNRAS. 1996, 281:L14–L16
- [164] J. G. Davies, A. G. Lyne, J. H. Seiradakis. Pulsar Associated with the Supernova Remnant IC 443[J]. Nature. 1972, 240:229–230

- [165] A. Lyne, G. Hobbs, M. Kramer, I. Stairs, B. Stappers. Switched Magnetospheric Regulation of Pulsar Spin-Down[J]. Science. Jul. 2010, 329:408. 1006.5184
- [166] P. S. Ray, M. Kerr, D. Parent, A. A. Abdo, et al. Precise γ-ray Timing and Radio Observations of 17 Fermi γ-ray Pulsars[J]. ApJS. Jun. 2011, 194:17. 1011.2468
- [167] M. Morii, N. Kawai, N. Shibazaki. A Pulse Profile Change Possibly Associated with a Glitch in the Anomalous X-Ray Pulsar 4U 0142+61[J]. ApJ. Mar. 2005, 622:544–548
- [168] F. P. Gavriil, R. Dib, V. M. Kaspi. The 2006-2007 Active Phase of Anomalous X-ray Pulsar 4U 0142+61: Radiative and Timing Changes, Bursts, and Burst Spectral Features[J]. ApJ. Aug. 2011, 736:138. 0905.1256
- [169] M. A. Livingstone, S. M. Ransom, F. Camilo, V. M. Kaspi, A. G. Lyne, M. Kramer, I. H. Stairs. X-ray and Radio Timing of the Pulsar in 3C 58[J]. ApJ. Dec. 2009, 706:1163–1173. 0901.2119
- [170] J. Middleditch, F. E. Marshall, Q. D. Wang, E. V. Gotthelf, W. Zhang. Predicting the Starquakes in PSR J0537-6910[J]. ApJ. Dec. 2006, 652:1531-1546. astro-ph/0605007
- [171] M. A. Livingstone, V. M. Kaspi, F. P. Gavriil. Long-Term Phase-coherent X-Ray Timing of PSR B0540–69[J]. ApJ. Nov. 2005, 633:1095–1100
- [172] M. S. Jackson, J. P. Halpern, E. V. Gotthelf, J. R. Mattox. A High-Energy Study of the Geminga Pulsar[J]. ApJ. 2002, 578:935–942
- [173] Cordes J. M., Downs G. S., Krause-Polstorff J. JPL pulsar timing observations V macro and microjumps in the Velar pulsar 0833-45[J]. ApJ. 1988, 330:847–869
- [174] T. V. Shabanova. Cyclical Changes in the Timing Residuals from the Pulsar B0919+06[J]. ApJ. Sep. 2010, 721:251–258. 1007.0125
- [175] R. Dib, V. M. Kaspi, F. P. Gavriil. Rossi X-Ray Timing Explorer Monitoring of the Anomalous X-ray Pulsar 1E 1048.1–5937: Long-term Variability and the 2007 March Event[J]. ApJ. Sep. 2009, 702:614–630. 0811.2659
- [176] R. N. Manchester, M. Kramer, I. H. Stairs, M. Burgay, F. Camilo, G. B. Hobbs, D. R. Lorimer, A. G. Lyne, M. A. McLaughlin, C. A. McPhee, A. Possenti, J. E. Reynolds, W. van Straten. Observations and Modeling of Relativistic Spin Precession in PSR J1141-6545[J]. ApJ. Feb. 2010, 710:1694–1709. 1001.1483
- [177] N. Wang, S. Johnston, R. N. Manchester. 13 years of timing of PSR B1259-63[J]. MNRAS. Jun. 2004, **351**:599–606

^{- 126 -}

- [178] L. M. Newton, R. N. Manchester, D. J. Cooke. Pulsar parameters from timing observations[J]. MNRAS. 1981, 194:841–850
- [179] F. Camilo, R. N. Manchester, A. G. Lyne, B. M. Gaensler, A. Possenti, N. D'Amico, I. H. Stairs, A. J. Faulkner, M. Kramer, D. R. Lorimer, M. A. McLaughlin, G. Hobbs. The Very Young Radio Pulsar J1357-6429[J]. ApJ. Aug. 2004, 611:L25–L28
- [180] R. N. Manchester, J. H. Taylor. Period irregularities in pulsars[J]. ApJ. 1974, 191:L63-L65
- [181] K. Torii, E. V. Gotthelf, G. Vasisht, T. Dotani, K. Kinugasa. A Giant Glitch in the Energetic 69 Millisecond X-Ray Pulsar AXS J161730-505505[J]. ApJ. May 2000, 534:L71–L74. arXiv:astro-ph/0003413
- [182] R. N. Manchester, L. M. Newton, W. M. Goss, P. A. Hamilton. Detection of a large period discontinuity in the longer period pulsar PSR 1641–45[J]. MNRAS. 1978, 184:35P–37P
- [183] C. S. Flanagan. A second giant glitch in PSR 1641-45[J]. MNRAS. 1993, 260:643-646
- [184] T. V. Shabanova. Nature of Cyclical Changes in the Timing Residuals from the Pulsar B1642-03[J]. ApJ. Aug. 2009, 700:1009-1016. 0906.3641
- [185] R. Dib, V. M. Kaspi, F. P. Gavril. Glitches in Anomalous X-Ray Pulsars[J]. ApJ. Feb. 2008, 673:1044–1061. arXiv:0706.4156
- [186] R. N. Manchester, G. Hobbs. A Giant Glitch in PSR J1718-3718[J]. ApJL. Aug. 2011, 736:L31
- [187] A. G. Lyne, M. A. McLaughlin, E. F. Keane, M. Kramer, C. M. Espinoza, B. W. Stappers, N. T. Palliyaguru, J. Miller. Unusual glitch activity in the RRAT J1819-1458: an exhausted magnetar?[J]. MNRAS. Dec. 2009, 400:1439–1444. 0909.1165
- [188] I. Cognard, D. C. Backer. A Microglitch in the Millisecond Pulsar PSR B1821-24 in M28[J]. ApJ. Sep. 2004, 612:L125–L127
- [189] M. A. Livingstone, V. M. Kaspi, E. V. Gotthelf, L. Kuiper. A Braking Index for the Young, High Magnetic Field, Rotation-Powered Pulsar in Kesteven 75[J]. ApJ. 2006, 647:1286– 1292
- [190] M. A. Livingstone, V. M. Kaspi, F. P. Gavriil. Timing Behavior of the Magnetically Active Rotation-Powered Pulsar in the Supernova Remnant Kesteven 75[J]. ApJ. Feb. 2010, 710:1710–1717. 0905.3567
- [191] J. W. T. Hessels, M. S. E. Roberts, S. M. Ransom, V. M. Kaspi, R. W. Romani, C.-Y. Ng, P. C. C. Freire, B. M. Gaensler. Observations of PSR J2021+3651 and its X-Ray Pulsar Wind Nebula G75.2+0.1[J]. ApJ. Sep. 2004, 612:389–397. arXiv:astro-ph/0403632

- [192] Z. Arzoumanian, E. V. Gotthelf, S. M. Ransom, S. Safi-Harb, R. Kothes, T. L. Landecker. Discovery of an energetic pulsar associated with SNR G76.9+1.0[J]. ApJ. 2011, 739:39–47
- [193] V. M. Kaspi, F. P. Gavriil, P. M. Woods, J. B. Jensen, M. S. E. Roberts, D. Chakrabarty. A Major SGR-like Outburst and Rotation Glitch from the No-Longer-So-Anomalous X-ray Pulsar 1E 2259+586[J]. ApJ. 2003, 588:L93
- [194] M. A. Livingstone, V. M. Kaspi. Long-term X-Ray Monitoring of the Young Pulsar PSR B1509-58[J]. ApJ. Nov. 2011, 742:31. 1110.1312
- [195] M. A. Alpar. Pinning and Threading of Quantized vortices in the pulsar crust superfluid[J]. ApJ. 1977, 213:527–530
- [196] R. I. Epstein, G. Baym. Vortex pinning in neutron stars[J]. ApJ. 1988, 328:680-690
- [197] M. A. Alpar, P. W. Anderson, D. Pines, J. Shaham. Vortex creep and the internal temperature of neutron stars. I. General theory[J]. ApJ. 1984, 276:325–334
- [198] G. Srinivasan, D. Bhattacharya, A. G. Muslimov, A. I. Tsygan. A novel mechanism for the decay of neutron star magnetic fields[J]. Current Sci. 1990, 59:31–38
- [199] M. Ruderman. Pulsar Spin, Magnetic Fields, and Glitches[C]. W. Becker, (Editor) Proc. 363rd Heraeus Seminar on Neutron stars and Pulsars. 2009, vol. 357 of Astrophysics and Space Science Library, 353
- [200] T. Wong, D. C. Backer, A. Lyne. Observations of a series of six recent glitches in the Crab pulsar[J]. ApJ. 2001, 548:447–459
- [201] C. M. Espinoza, A. G. Lyne, M. Kramer, R. N. Manchester, V. M. Kaspi. The Braking Index of PSR J1734-3333 and the Magnetar Population[J]. ApJ. Nov. 2011, 741:L13. 1109. 2740
- [202] M. A. Alpar, P. W. Anderson, D. Pines, J. Shaham. Vortex creep and the internal temperature of neutron stars. II. Vela pulsar[J]. ApJ. 1984, 278:791–805
- [203] M. A. Alpar, K. S. Cheng, D. Pines. Vortex creep and the internal temperature of neutron stars: Linearand nonlinear response to a glitch[J]. ApJ. 1989, 346:823–832
- [204] M. A. Alpar, A. Baykal. Pulsar braking indices, glitches and energy dissipation in neutron stars[J]. MNRAS. Oct. 2006, 372:489–496. arXiv:astro-ph/0608055

致 谢

在我的博士学业即将结束之际,我想首先向我的父母表达深深的谢意。在 我遇到困难面临巨大压力的时候,他们所提供的物质上和精神上的莫大帮助, 使我得以闯过难关。我感谢我的导师徐仁新教授。徐老师是我做科研工作的引 路人,在我的工作遇到问题和困难的时候,他总是给予适时的指导和鼓励。我 感谢乔国俊教授。乔老师与徐老师共同把我推荐到澳大利亚国家射电天文台学 习,使我能够有机会学习到脉冲星计时观测的相关技术,并且拓展了视野。我 感谢我的师兄岳友岭和脉冲星组及天文系其他亲爱的同学。在工作中,我常常 受益于与他们的讨论,感谢他们给予我的帮助。

我感谢我在澳大利亚国家射电天文台的导师Richard N. Manchester教授。在 澳大利亚留学期间,Manchester教授对我进行了细致入微的指导,经常是手把 手的传授数据处理的方法。我感谢Manchester教授对我给予了充分的信任,多 次派我到Parkes天文台执行观测任务。我感谢我在澳大利亚国家射电天文台的 另外一位导师George B. Hobbs博士。Hobbs博士不仅在工作中给予我充分的指导 和信任,而且还和他的夫人一起在生活上对我关怀备至。我感谢澳大利亚国家 射电天文台脉冲星组的其他同事、伙伴以及那里的其他同行和工作人员,感谢 他们在我留学期间对我给予的巨大帮助。我感谢Parkes天文台的工作人员。在 我执行观测任务时,工程师们提供了有益的指导和非常有利的协助,后勤人员 无微不至的关照于我在那里的生活。

北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明:所呈交的学位论文,是本人在导师的指导下,独立进行研 究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外,本论文不含任何其他个 人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人 和集体,均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名: 日期: 年 月 日

学位论文使用授权说明

本人完全了解北京大学关于收集、保存、使用学位论文的规定,即:

按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本;

学校有权保存学位论文的印刷本和电子版,并提供目录检索与阅览服务;

学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文;

在不以赢利为目的的前提下,学校可以公布论文的部分或全部内容。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名: 导师签名:

日期: 年月日