

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.04.07

脉冲星巡天观测进展和近邻 脉冲星样本估算

张 蕾^{1,2}, 王 培², 李 蔚^{2,3},
张 洁¹, 岳友岭^{2,3}, 刘 姝²

(1. 西华师范大学, 四川 637000; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 3. 中国科学院 射电天文重点实验室, 南京 210008)

摘要: 射电脉冲星巡天是探测获取更多脉冲星的重要途径。首先介绍了影响射电脉冲星巡天效率的因素, 着重分析灵敏度和观测频率两个重要因素, 并通过定义脉冲星探测率, 简化对脉冲星巡天效率的估算。此外, 总结了现有脉冲星巡天项目, 利用 Parkes 多波束脉冲星及两次扩充巡天 (Swinburne 中纬度脉冲星巡天和 Parkes 高纬度脉冲星巡天) 结果, 采用包含时间演化的脉冲星分布模拟软件 PsrPopPy, 模拟得到脉冲星在银河系中分布的样本, 并对近邻太阳系 1 kpc 距离内的脉冲星数目进行了估算, 获得了近邻脉冲星样本, 可为脉冲星高能辐射对探测宇宙线正电子谱影响等研究提供可靠输入量。

关键词: 脉冲星; 脉冲星巡天; 脉冲星模拟

中图分类号: P145.6 **文献标识码:** A

1 引 言

自从 1967 年第一颗脉冲星被发现以来^[1], 脉冲星搜寻和观测的新发现及新结果极大地推动了相关研究领域的发展。1972 年, 在蟹状星云超新星遗迹中发现脉冲星, 其证实超新星爆发是中子星产生的主要机制^[5]。1974 年, 脉冲双星系统 PSR B1913+16 的发现间接证实了引力波^[2-4], 荣获诺贝尔物理学奖。1982 年, 毫秒脉冲星 PSR B1937+21 的发现得到了比普通脉冲星年龄更老、磁场更弱、自转周期更短的中子星样本^[6, 7]。1990 年, 通过脉冲星 PSR B1257+12 搜寻行星系统, 首次在太阳系外发现行星系统^[8]。这些都显示了脉冲星搜寻研究的重要性。

收稿日期: 2015-08-04; 修回日期: 2015-09-18

资助项目: 973 项目 (2012CB821802); 国家自然科学基金 (11373038, 11273020, 11103045); 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB09000000); 中国科学院国家天文台青年人才基金项目资助

通讯作者: 张蕾, leizhang996@nao.cas.cn

近年来射电脉冲星巡天研究十分活跃, 发现的脉冲星数目迅速增加, 目前已知脉冲星 2525 颗^[9]。随着可用于脉冲星巡天的射电望远镜口径增大, 观测频率从低到高发展, 巡天工作不断深入。目前, L 波段已成为脉冲星巡天项目中的主要波段^[10]。其中, 澳大利亚 Parkes 的 64 m 可转动抛物面天线射电望远镜, 在脉冲星巡天工作中所做贡献最为突出。Parkes 多波束巡天 (Parkes Multibeam Pulsar Survey, 简称 PKSMB)^[11-16], Parkes-Swinburne 中纬度脉冲星巡天 (Parkes Swinburne Multibeam Pulsar Survey, 简称 PKSSW)^[56] 和 Parkes 高纬度脉冲星巡天 (Parkes High-latitude Multibeam Pulsar Survey, 简称 PKSHL)^[47], 这三次巡天中探测到的脉冲星共有 1407 颗^[9], 超过已发现脉冲星总数的一半^[9]。

2006 年, Lorimer 等人通过统计 PKSMB 和 PKSHL 两次巡天中所发现的 1008 颗正常射电脉冲星 (即周期短于 30 ms 的孤立射电脉冲星) 主要参数, 提出了银河系中脉冲星关于自转周期、光度、距离银心距离和距离银道面高度的概率分布函数^[16]。基于此分布函数, 用巡天发现的正常脉冲星数目作为计算输入量, 采用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法, 模拟可得到脉冲星在银河系中分布的样本。此外, Dan 等人和 Ilias 等人分别通过模拟银河系中 γ 射线脉冲星的分布, 估算了 γ 射线脉冲星对宇宙线正电子的影响^[18, 19]。特别值得一提的是, Tim 等人仅通过估算距离地球最近的两颗 γ 脉冲星 Geminga 和 Monogem 对正电子的贡献, 就能够较好地模拟出观测到的高能过量正电子谱^[20], 这就说明模拟脉冲星产生宇宙线正电子的计算, 敏感依赖于脉冲星在银河系中的分布。因此, 可以在此样本基础之上获得脉冲星在太阳系附近的分布样本, 结合脉冲星外间隙模型等高能辐射模型, 进一步研究模拟 γ 脉冲星在不同区域的分布函数, 通过估算距离地球较近 γ 脉冲星辐射, 有助于人们定量评估脉冲星高能辐射对暗物质粒子测量本底的影响。

本文第 2 章, 讨论影响射电脉冲星巡天的重要因素, 并定义脉冲星探测率, 直观给出射电望远镜探测灵敏度和巡天效率对脉冲星巡天的影响; 第 3 章, 对现有主要脉冲星巡天项目进行总结; 第 4 章, 运用蒙特卡罗方法得到脉冲星在银河系中样本分布, 在此样本基础之上对 PKSMB, PKSSW, PKSHL 分别进行虚拟观测, 获得了距离太阳系 1 kpc 内的脉冲星样本; 第 5 章, 对全文进行总结。

2 影响射电脉冲星巡天的重要因素

2.1 巡天灵敏度

很多因素会影响脉冲星搜寻灵敏度, 主要包括接收机和天空背景噪声温度、天线增益、观测带宽、积分时间、脉冲宽度、色散量和脉冲星相对宽度, 以及数据数字化处理算法和干扰水平等。所能探测脉冲星辐射流量下限的基本表达式为^[21]:

$$S_{\min} = \frac{\alpha\beta T_{\text{sys}}}{G\sqrt{N_p\Delta\nu T}} \left(\frac{W_{\text{eff}}}{P - W_{\text{eff}}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

其中, α 是信噪比阈值 (即 $\frac{S}{N_{\min}}$); β 是数字化及其他处理过程的损失因子 (通常大于 1); 系

统噪声温度 $T_{\text{sys}} = T_{\text{rec}} + T_{\text{spill}} + T_{\text{atm}} + T_{\text{sky}} + T_{\text{loss}}$, 能反映接收机噪声温度 T_{rec} , 旁瓣进入的地面辐射温度 T_{spill} , 地球大气层的发射引起的噪声 T_{atm} , 天空背景噪声温度 T_{sky} , 馈源和输入到接收机前段的波导损耗 T_{loss} 贡献的总和; G 是天线增益; N_p 是偏振数目; $\Delta\nu$ 是频带宽度; T 是观测时间; P 是观测的脉冲周期; W_{eff} 是有效脉冲宽度。

W_{eff} 不仅包含脉冲星辐射的固有脉冲宽度, 还包括信号采样以及穿过星际介质时所引起的致宽量, 可表达为^[21]:

$$W_{\text{eff}} = \sqrt{W_{\text{int}}^2 + \tau_{\text{samp}}^2 + \tau_{DM}^2 + \tau_{\text{scatt}}^2} \quad (2)$$

其中, τ_{samp} 是采样时间; W_{int} 是固有脉冲宽度, 符合以下经验关系^[22]:

$$\lg W_{\text{int}} = \lg \left[0.06 \left(\frac{P}{\text{ms}} \right)^{0.9} \right] + \Gamma \quad (3)$$

P 是以毫秒 (ms) 为单位的脉冲周期, Γ 是一个符合高斯分布的随机误差值; τ_{DM} 是每一频率通道由星际介质色散量 DM 引起的致宽量, τ_{scatt} 是由星际散射所引起的致宽量, 两者的表达式分别为^[23, 24]:

$$\tau_{DM} = 8.3(\mu\text{s}) \times DM \times \frac{\Delta f_{\text{MHz}}}{f_{\text{GHz}}^3} \quad (4)$$

$$\lg \left(\frac{\tau_{\text{scatt}}}{\text{ms}} \right) = -6.46 + 0.154 \lg DM + 1.07 (\lg DM)^2 - 3.86 \lg f_{\text{GHz}} \quad (5)$$

Δf 为通道频率宽度 (MHz), f 是观测频率 (GHz), DM 是色散量 (pc/cm^3)。

基于灵敏度基本表达式中 $\frac{W_{\text{eff}}}{P - W_{\text{eff}}}$ 为脉冲星相对宽度 (典型值 $\leq 10\%$), 表明观测脉冲星辐射的窄脉冲比宽脉冲信号具有更高的探测灵敏度。另外, 通过降低接收机本身的固有噪声, 增大天线有效接收面积, 采用双偏振观测模式和多通道消色散接收机, 以及延长观测时间和快速采样, 都能有效提高观测系统的灵敏度, 有助于人们在射电波段“看”到更弱的脉冲星。

2.2 巡天观测频率

除观测系统的灵敏度之外, 所使用的观测频率也是影响射电脉冲星搜寻工作的另一重要因素。由式 (1) 可知, 脉冲星搜寻工作中受到观测频率影响的主要方面有:

(1) 星际介质对脉冲信号的色散效应。从式 (4) 中可看出, 星际介质对脉冲信号的色散效应强度与中心频率的三次方 f^3 成反比, 观测频率越高, 色散效应引起的致宽量越小。

(2) 星际介质对脉冲信号的散射效应。由式 (5) 可得, 星际介质对脉冲信号的散射效应强度近似与中心频率的四次方成反比。

(3) 射电脉冲星频谱。射电脉冲星的频谱较陡, 典型的谱指数约在 $-1.5 \sim -2.0$ 之间。

(4) 银河背景辐射频谱。银河背景辐射的谱指数约为 -2.6 ^[25], 比典型的脉冲星谱指数更陡。

(5) 射电望远镜的波束宽度。射电望远镜的波束尺度与观测频率 f 成反比。

表 1 观测频率对观测相关量的影响

观测相关量	与频率关系	产生效应	优势频段
色散致宽	f^{-3}	观测频率越高, 色散效应越弱	高频
散射致宽	f^{-4}	观测频率越高, 散射效应越弱	高频
射电脉冲星频谱	$f^{-2.0} \sim f^{-1.5}$	射电脉冲星流量密度随观测频率的升高而快速降低	低频
银河背景辐射频谱	$f^{-2.6}$	银河背景辐射频谱相比脉冲星具有随 f 更快的下降率	高频
波束尺度	f^{-1}	观测频率越高, 射电望远镜的波束宽度较小, 搜寻效率较低	低频

综合以上因素, 表 1 列出观测频率对观测相关量的影响, 并给出各量在巡天观测中的优势频段。

不同的观测频率一定程度上影响脉冲星巡天效率, 因此在射电脉冲星搜寻工作中应该结合具体的科学目标选择观测频率。

2.3 脉冲星巡天探测率

目前广泛采用蒙特卡罗方法模拟银河系中脉冲星的分布样本, 并通过设定射电望远镜的各观测参数, 对该模拟样本进行虚拟观测, 得到脉冲星探测率。Smits 等人 2009 年已对正在建设的 FAST 射电望远镜, 在银经 $20^\circ < l < 90^\circ$, 银纬 $|b| < 10^\circ$ 范围内, 模拟研究了 FAST 脉冲星探测率, 在观测中心频率 1315 MHz、带宽 400 MHz、积分时间为 600 s 条件下, 可模拟探测到银河系中约 6900 颗射电脉冲星, 其中约 6500 颗为尚未发现的脉冲星。

为了简化对脉冲星巡天探测率的估算过程, 我们定义脉冲星巡天探测率:

$$DR = \int_{\alpha S_{\min}}^{\infty} \theta^2 \frac{S}{S_{\min}} N(S) dS \quad . \quad (6)$$

其中 α 为信噪比阈值; θ 为波束宽度 (θ^2 可反映射电望远镜巡天效率); S 是脉冲星流量, S_{\min} 是在一定积分时间内脉冲星巡天的最小可探测流量, 在此 $\frac{S}{S_{\min}}$ 即可表示成信噪比; $N(S)$ 为可探测脉冲星数目 N 随脉冲星流量 S 的分布函数, 目前并没有广为接受的分析或数值形式。Smits 等人 2009 年所使用的脉冲星样本模拟^[16]是基于简单的参数假设, 我们正在对其进行优化。随着 $N(S)$ 函数形式的更好约束, 式 (6) 将直观地提供比较影响巡天效率多种因素的分析解, 尤其是望远镜口径和巡天频率, 为优化巡天模式提高量化依据。

3 射电脉冲星巡天总结

3.1 主要巡天项目

依据最新的脉冲星数据库结果^[9], 表 2 列出主要的巡天项目名称、接收机频率、探测到新脉冲星数目。为了方便分析, 我们按系统观测频率将已有巡天项目分成两类:

(1) 较高频率巡天

较高频率搜寻工作的观测中心频率主要处于 1400 MHz 附近, 其观测效应相对低频而言, 星际介质对脉冲信号的色散和散射效应较弱, 天空背景噪声温度较低。一方面, 根据式 (1) 可知, 较高的观测频率有利于提高脉冲星探测率; 另一方面, 脉冲星的流量密度在高频段较小, 不利于频谱较陡的脉冲星信号探测。此外, 观测频率越高, 射电望远镜的波束宽度越小, 会直接影响搜寻效率。

(2) 较低频率巡天

较低频率搜寻工作的观测中心频率处于 400 MHz 附近。低频观测由于受色散、散射及天空背景等影响较大, 以致探测率较低, 但低频段脉冲星流量密度较强, 有利于搜索谱指数较大的脉冲星; 且观测频率越低, 射电望远镜的波束宽度越大, 有助于提高搜寻效率。

图 1 展示了为表 2 中所列高低频巡天探测的射电脉冲星在银河系内的分布。高频巡天探测到的射电脉冲星主要集中在银道面附近, 而低频巡天探测到的脉冲星分布于较大天区; 这是由于射电望远镜的波束宽度与观测频率成反比, 通常选用低频做较大天区巡天, 高频常用以做银道面巡天。从上述脉冲星巡天中我们可看到各个巡天探测脉冲星的能力是有区别的, 造成此区别的原因有很多, 比如: 观测系统灵敏度、观测频率、搜寻天区等。

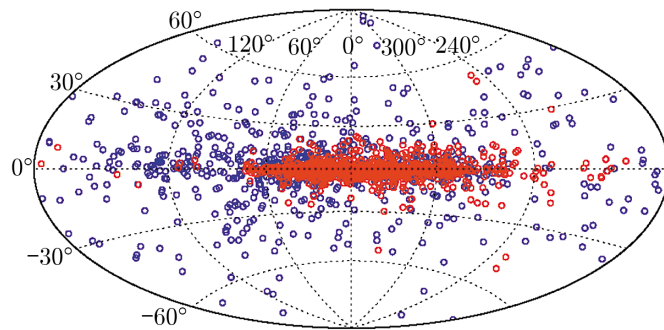


图 1 巡天项目探测的脉冲星在银河系内的分布

红色圆圈为高频波段观测所探测到的射电脉冲星, 蓝色圆圈为低频波段观测所探测到的射电脉冲星。

3.2 Parkes 望远镜巡天项目

Parkes 64 m 射电望远镜的 PKSMB 巡天是目前为止最成功的一次脉冲星巡天。PKSMB 自 1997 年 8 月开始巡天^[94], 此次巡天覆盖的天区范围是在银经 $l = 260^\circ$ 至 $l = 50^\circ$, 银纬 $|b| \leq 5^\circ$ 。巡天所采用观测中心频率为 1374 MHz, 在此观测频率下系统噪声温度约为 25 K, 数字化及其他处理过程的损失因子 β 约为 1.5, 波束平均增益为 0.643 K/Jy。选用了双偏振观测, 总带通宽度 288 MHz, 分为 96 个带宽为 3 MHz 的通道, 采样时间间隔为 250 μ s, 每一指向积分时间为 2100 s, 波束平均半高全宽为 14.28 arcmin, 中心波束极限灵敏度约为 0.14 mJy^[11]。根据式 (1), 信噪比大于 9 的脉冲星信号原则上均能被探测到^[16]。PKSMB 对年轻脉冲星和毫秒脉冲星, 特别是位于银盘深处的中短周期脉冲星的探测率有很大提高。现已探测到 1122 颗脉冲星, 其中正常脉冲星数目 1086 颗, 发现新脉冲星 834 颗^[9]。Parkes 多波

表 2 主要脉冲星巡天

高频率巡天				
巡天名称	望远镜名称	观测频率/MHz	探测脉冲星数目	新脉冲星数目
PALFA ^[26-34]	Arecibo	1440	76	49
HTRU_Eff ^[35]	Effelsberg	1360	15	13
HTRU_Pks ^[36-42]	Parked	1352	838	111
JB2 ^[43]	Jodrell	1440	62	42
PKS1 ^[44-46]	Parkes	1500	100	46
PKSHL ^[47]	Parkes	1374	41	18
PKSMB ^[11, 48-50, 52-55]	Parkes	1374	1122	834
PKSSW ^[56-60]	Parkes	1374	244	109
PKSPA ^[61]	Parkes	1374	15	14
PKSGP ^[62]	Parkes	1374	18	16
低频率巡天				
巡天名称	望远镜名称	观测频率/MHz	探测脉冲星数目	新脉冲星数目
AR1 ^[63, 64]	Arecibo	430	49	41
AR2 ^[65]	Arecibo	430	24	2
AR3 ^[66]	Arecibo	430	61	24
AR4 ^[67-75, 77, 78, 82]	Arecibo	430	138	91
AR327 ^[79]	Arecibo	327	24	22
GB1 ^[80]	GBT	400	50	31
GB2 ^[43]	GBT	400	82	34
GB3 ^[81]	GBT	400	87	20
GB4 ^[82]	GBT	378	83	5
GB350 ^[83-87]	GBT	350	60	59
GBNCC ^[88]	GBT	350	122	65
JB1 ^[89]	Jodrell	408	51	37
MOL1 ^[90]	Molonglo	408	34	31
MOL2 ^[91]	Molonglo	408	224	155
PKS70 ^[92, 93]	Parkes	430	298	101

束巡天, 主要成功之处在于增加每次观测的时间, 从约 4 min 提高到 35 min, 灵敏度得到较大的提高。表面上多波束能提高巡天速度, 实际上是为增加观测时间创造条件。

此外, 自 1998 年 8 月开始进行的 PKSSW^[56] 和自 2001 年 11 月开始进行的 PKSHL^[47], 与 PKSMB 采用了相同的观测系统和数据处理过程, 仅采样时间、积分时间及覆盖天区有所不同, 所以这两次巡天可作为 PKSMB 的扩充^[16]。PKSSW 天区覆盖范围为 $l = 260^\circ$ 至 $l = 50^\circ$, $|b| \leq 30^\circ$; PKSHL 天区覆盖范围为 $220^\circ \leq l \leq 260^\circ$, $|b| \leq 60^\circ$; PKSSW 和 PKSHL 积分及采样时间均一致, 分别为 $265 \mu\text{s}$ 和 $125 \mu\text{s}$ ^[47, 56, 95]。PKSHL 探测到 244 颗脉冲星, 其

中正常脉冲星数目为 221 颗; Parkes 高纬度脉冲星巡天探测到 41 颗脉冲星, 其中有正常脉冲星数目 34 颗。Parkes 开展的三次巡天共探测到脉冲星 1377 颗, 其中正常脉冲星数目为 1364 颗^[9]。巡天的相关参数列于表 3 中, 图 2 给出 Parkes 三次巡天的覆盖天区, 以及所探测正常脉冲星在银河系中的分布。

表 3 PKSMB, PKSSW, PKSHL 的巡天参数

巡天项目	PKSMB	PKSSW	PKSHL
数字化损失因子	1.5	1.5	1.5
天线增益/ $\text{K}\cdot\text{Jy}^{-1}$	0.643	0.634	0.634
观测时间/s	2100	265	265
采样时间/ μs	250	125	125
系统温度/K	25	25	25
中心频率/MHz	1374	1374	1374
带宽范围/MHz	288	288	288
子通道带宽/MHz	3.0	3.0	3.0
偏振数目	2	2	2
半高全宽/arcmin	14.28	14.28	14.28
银经最小值/ $^{\circ}$	-100	-100	-140
银经最大值/ $^{\circ}$	50	50	-100
银纬最小值/ $^{\circ}$	-5	-30	-60
银纬最大值/ $^{\circ}$	5	30	60
信噪比阈值	9.0	9.0	9.0

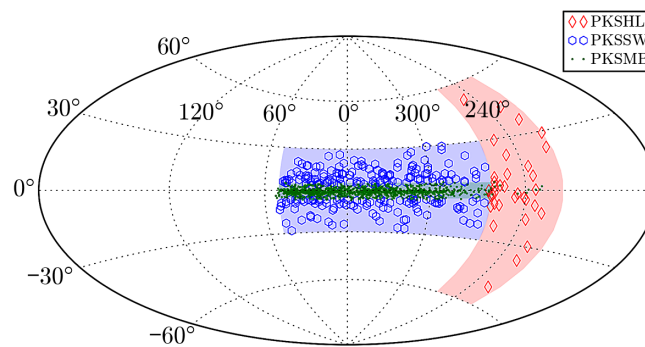


图 2 PKSMB, PKSSW, PKSHL 三次巡天范围和各所探测正常脉冲星在银道坐标系下的分布

图中绿色圆点(区域)表示 PKSMB 所探测的正常脉冲星(搜寻天区范围); 蓝色六边形(区域)表示 PKSSW 所探测的正常脉冲星(搜寻天区范围); 红色菱形(区域)表示 PKSHL 所探测的正常脉冲星(搜寻天区范围)。

4 模拟获取银河系内脉冲星分布样本

4.1 模拟脉冲星在银河系中的分布样本

巡天是在一定灵敏度和天区覆盖条件下通过观测获取脉冲星样本。根据统计巡天得到的脉冲星样本, 可以建立参数模型, 通过蒙特卡罗模拟银河系中脉冲星分布, 并可设置望远镜参数进行模拟观测。

Lorimer 等人 2006 年通过统计分析当时 PKSMB 和 PKS HL 两次巡天所探测到的 1008 颗正常脉冲星, 基于银河系中自由电子密度分布 C 模型^[96], 且不考虑脉冲星随时间的演化, 对脉冲星密度距离银心距离 R 、脉冲星数目距离银道面高度 Z 、脉冲星关于光度 L 和自转周期 P 的分布函数进行拟合后得到了参数模型^[16]。基于该脉冲星参数模型, Lorimer 等人 2006 年开发了 PsrPop^[97] 模拟银河系中脉冲星分布的软件包。

PsrPop 做模拟过程中, 存在例如未考虑脉冲星分布随时间演化等不足。Bates 等人 2014 年在 PsrPop 基础上重新开发了名为 PsrPopPy^[98] 脉冲星分布模拟软件包, 不仅增添了脉冲星分布随时间的演化, 而且在脚本中提供了多种分布模型, 可根据需要选择使用。本文使用 PsrPopPy 软件, 在使用脉冲星随时间演化模型基础之上, 增添了输入样本的数目, 改用对数正态分布的光度函数以避免其他分布函数中采用的截断处理^[98], 对银河系中脉冲星的分布做了更新模拟, 相比 PsrPop 更真实可靠地模拟样本。

选择 PKSMB, PKS HL 和 PKS SW 三次巡天中所探测到的 1364 颗正常脉冲星数目作为输入样本。在模拟获得脉冲星在银河系中的分布过程中, 虚拟 PKSMB, PKS HL 和 PKS SW 模拟巡天发现的正常脉冲星数目达到 1364 颗时, 模拟停止, 生成正常脉冲星在银河系中的分布样本。此次模拟工作中所选用的模型及其参数列于表 4 中。

表 4 使用 PsrPopPy 做脉冲星在银河系中模拟时所使用的参数

巡天选用项目	PKSMB, PKS SW, PKS HL	电子密度分布模型	NE2001
样本数目	1364 颗	有效脉冲宽度/(%)	6
半径 (R) 分布模型	lf06	散射模型	Bhat04
初始距离 (z) 分布	指数	散射指数	-3.86
初始标高/kpc	0.33	脉冲星自转减慢模型 ^[103]	FK06
光度 (L) 分布	对数正态	制动指数	3.0
平均值 ($\lg L$)/mJy \cdot kpc ⁻²	-1.1	脉冲星最大年龄/Ga	1
标准差 ($\lg L$)/mJy \cdot kpc ⁻²	0.9	初始磁场分布	对数正态
初始周期 (P) 分布	对数正态	平均值 ($\lg B$)/T	1.265×10^{-3}
平均值 ($\lg L$)/ms	2.7	标准差 ($\lg B$)/T	0.55×10^{-4}
标准差 ($\lg L$)/ms	0.34		
脉冲星谱指数分布	高斯		
平均值	-1.4		
标准差	0.96		

由于使用蒙特卡罗方法进行模拟, 样本产生具有随机性, 多次模拟过程中所得样本数目

虽有所不同,但是各自间差别不大。为了检验数值模拟的可靠性,我们进行了多次模拟,选取与多次模拟结果的平均值相差数目最小的一个正常脉冲星在银河系中分布的样本,如图 3 为该样本中所有脉冲星在银河系 x 和 y 方向上投影分布。模拟产生的正常脉冲星数目大于 1.4×10^5 颗。

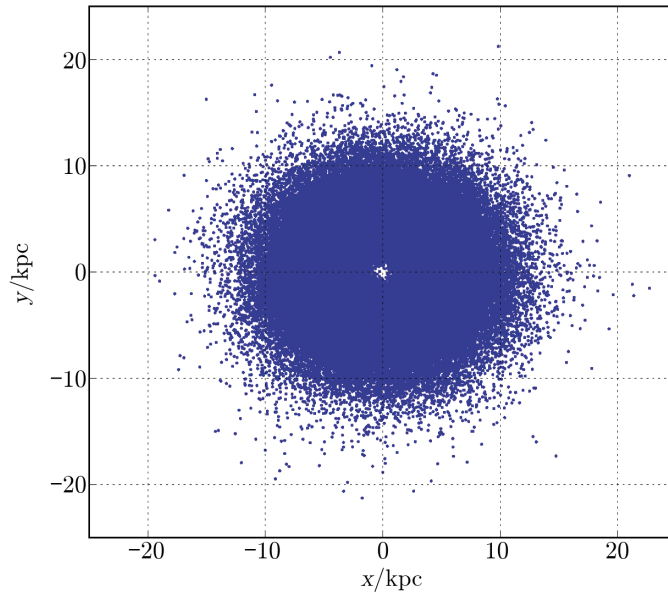


图 3 脉冲星在银河系中分布的样本

根据多次模拟所得正常脉冲星在银河系中分布的样本,我们对脉冲星密度随银心距 R 的分布函数采用伽马函数公式^[16]重新拟合,

$$\rho(R) = A \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^B \exp \left[-C \left(\frac{R - R_{\odot}}{R_{\odot}} \right) \right] \quad (7)$$

表 5 分别给出 Lorimer 等人 2006 年及本文工作对脉冲星密度随距离银心距离 R 的分布函数参数化结果。图 4 清晰表明,我们的模拟结果中脉冲星密度随距离银心距离 R 的分布要高于之前 Lorimer 等人 2006 年使用 PsrPop (Lorimer06) 对银河系内正常脉冲星所做模拟的结果。

表 5 脉冲星密度随距离银心距离 R 的分布函数参数

参量	PsrPop/kpc ⁻²	PsrPopPy /kpc ⁻²
A	41 (5)	310.9 (3)
B	1.9 (3)	4.3 (4)
C	5.0 (6)	7.9 (2)

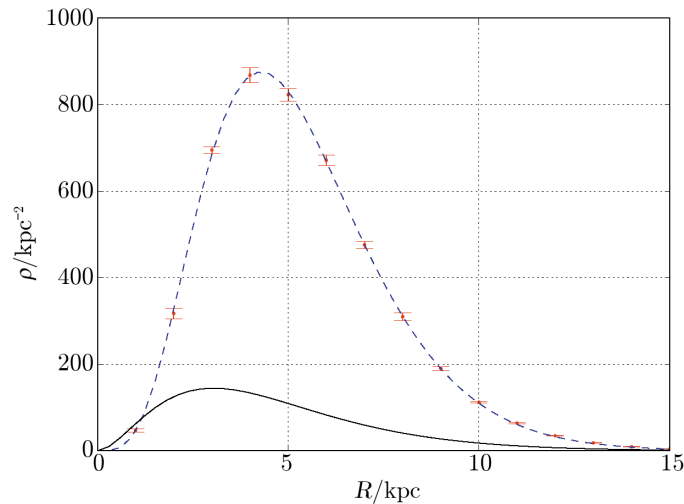


图 4 脉冲星密度随距离银心距离 R 的分布函数

虚线表示 PsrPop 中脉冲星密度随距离银心距离 R 的分布函数; 误差棒表示使用 PsrPopPy 经多次模拟后脉冲星密度随距离银心距离 R 的分布函数; 实线是利用式 (7) 对这些点进行拟合, 拟合参数如表 5 所示。

基于所得的正常脉冲星在银河系中分布的样本, 通过设定 PKSMB, PKSHL 和 PKSSW 三次巡天参数 (各自观测系统参数见表 2), 对三次巡天进行模拟探测。三次巡天所探测到正常脉冲星模拟结果和多次模拟巡天观测结果的平均值和标准差列于表 6, 将模拟结果和巡天观测结果相比较, 两者间的数目差别不大。图 5 为模拟 PKSMB, PKSHL 和 PKSSW 三次巡天探测到的正常脉冲星在银河系的分布样本。

表 6 PKSMB, PKSSW 和 PKSHL 三次巡天探测的脉冲星数目

	PKSMB	PKSSW	PKSHL
真实探测数值	1086	221	36
模拟探测平均值	1089	248	45
模拟探测标准差	7.6	6.2	4.9

4.2 太阳系近邻脉冲星样本

脉冲星的高能辐射可以对很多基于宇宙线测量的物理实验产生影响, 例如脉冲星加速的高能带电粒子及其电磁级联过程中产生的大量正电子可直接影响阿尔法磁谱仪 (AMS-02) 等实验的探测本底。Dan 等人和 Ilias 等人都分别通过模拟银河系中 γ 脉冲星分布, 估算过脉冲星高能辐射对探测宇宙线正电子的影响^[18, 19]。最近 Tim 等人仅考虑近邻脉冲星 Geminga ($D \approx 157$ pc) 和 Monogem ($D \approx 290$ pc) 的贡献, 就能够与 5 ~ 200 GeV 能量范围内的过量正电子谱测量结果较好地符合^[20], 说明模拟脉冲星高能辐射对宇宙线测量的影响, 极大地依赖于近邻脉冲星的分布。

我们首先根据宇宙线在星际空间传播的漏箱模型^[101], 在 AMS-02 能量范围 (0 ~

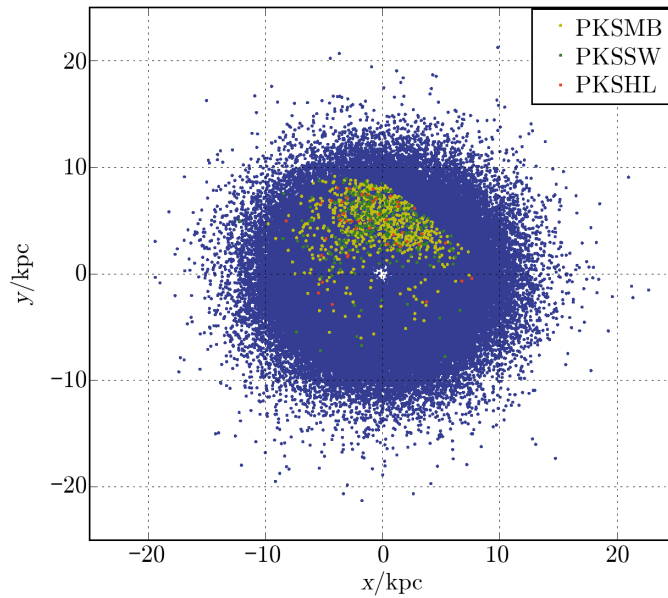


图 5 虚拟 PKSMB, PKSSW 和 PKSHL 三次巡天所探测到的正常脉冲星在银河系中的分布

黄色、绿色、红色圆点分别标识 PKSMB、PKSSW、PKSHL 模拟所探测的正常脉冲星；蓝点表示模拟所得整个银河系中脉冲星分布情况，在此使用的即为图 3 所给出的脉冲星在整个银河系中的分布样本。

$500 \text{ GeV})^{[100]}$ ，估算了正电子的最大扩散距离约为 1 kpc ；其次，在 3.2 节更新脉冲星参数模型，重新模拟脉冲星在银河系分布样本的基础上，获取了银河系中距离太阳系 $(0.0, 8.0, 0.0) \text{ kpc}$ 位置在 1 kpc 范围内的脉冲星分布样本，在 $x-y$, $x-z$, $y-z$ 不同投影方向的脉冲星分布结果如图 6 所示。结果表明，银河系内共产生脉冲星约 1.4×10^5 颗，其中距太阳系 1 kpc 范围内有约 648 颗，根据脉冲星外间隙模型等脉冲星高能辐射模型估算 γ 脉冲星数目约为脉冲星总数的 $2\%^{[102]}$ ，在 1 kpc 范围内约产生 13 颗 γ 脉冲星。太阳系近邻 γ 脉冲星样本可为我们在较大能量范围内定量测量本底提供可靠输入量，对进一步约束限制 AMS-02 等实验探测暗物质结果具有重要意义。

5 总 结

脉冲星巡天是搜寻射电脉冲星的重要途径之一，脉冲星巡天结果的优劣往往紧密依赖于最小探测灵敏度和观测频率。模拟观测研究能够为实际观测提供关于观测频率、积分时间、观测天区等指导信息，对提高脉冲星巡天效率具有重要意义。本文采用模拟方法对射电脉冲星的巡天结果做预期，还通过我们定义的脉冲星探测率，根据射电望远镜的口径大小、巡天灵敏度及脉冲星本身数目与流量的分布关系，用更简单直接的方法对射电脉冲星巡天结果做估算。

迄今为止，通过脉冲星搜寻共发现脉冲星 2525 颗。我们选取 PKSMB, PKSBL, PKSSW

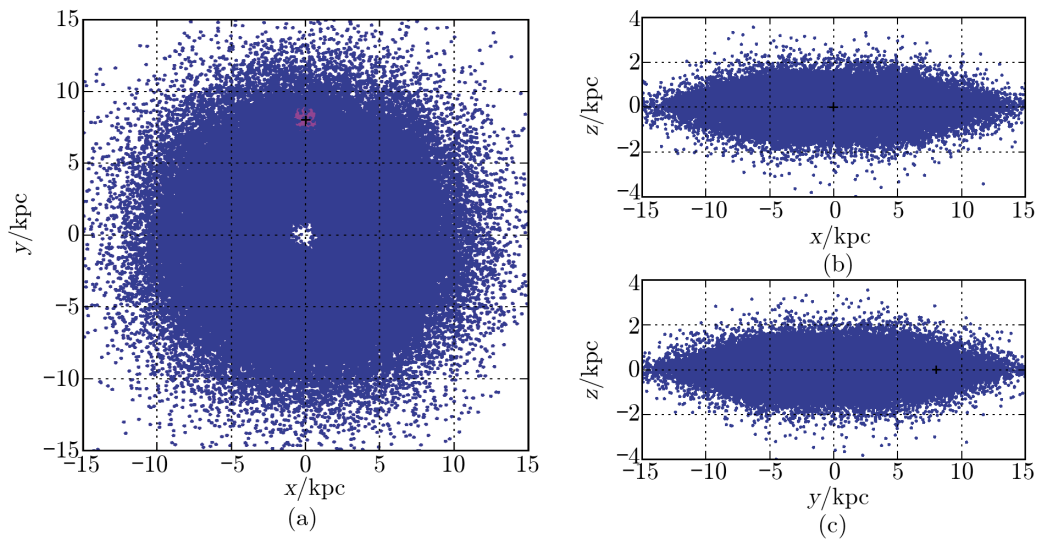


图 6 距离太阳 1 kpc 的脉冲星分布样本

黑色十字表太阳位置; 紫点表示距离太阳系 1 kpc 以内的脉冲星, 共有 648 颗; 蓝点表示距离太阳 1 kpc 以外的脉冲星, 共有 142 839 颗。(a) 为样本在 $x - y$ 方向上的分布情况; (b) 为样本在 $x - z$ 方向上的分布情况; (c) 为样本在 $y - z$ 方向上的分布情况。图中 1 kpc 范围内出现蓝点是银盘投影效果造成的。

搜寻得到的 1364 颗脉冲星, 在考虑脉冲星随时间演化基础之上, 增添了输入样本的数目, 采用了对数正态分布的光度函数, 对银河系中脉冲星的分布做了蒙特卡罗模拟, 更新了脉冲星在银河系中的分布函数, 并进一步获得了太阳系邻近范围内的脉冲星分布样本。模拟结果表明, 银河系内含正常脉冲星约 1.4×10^5 多颗, 在距太阳 1 kpc 范围内有约 600 多颗。

模拟得到的脉冲星在银河系内和太阳系附近的分布样本, 为研究 γ 脉冲星的分布函数, 进一步定量评估邻近脉冲星高能辐射对基于宇宙线测量实验的本底影响等提供输入量, 对理解和限制实验结果的测量本底具有重要意义。

参考文献:

- [1] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. Nature, 1968, 217: 709
- [2] Hulse R A, Taylor J H. ApJ, 1974, 191: L59
- [3] Hulse R A. Reviews of Modern Physics, 1994, 66: 699
- [4] Taylor J H. Reviews of Modern Physics, 1994, 66: 711
- [5] Davies J G, Lyne A G, Seiradakis J H. Nature, 1972, 240: 229
- [6] Backer D C. In: Esward P, van den H eds. Timing Neutron Stars, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1989: 3
- [7] Taylor J H. In: Esward P, van den H eds. Timing Neutron Stars, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1989: 17
- [8] Wolszczan A, Frail D. Nature, 1992, 355: 145
- [9] ATNF Pulsar Catalogue. <http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>, 2015

- [10] Lorimer D R, Kramer M. Handbook of Pulsar Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- [11] Manchester R N, Lyne A G, Camilo F, et al. MNRAS, 2001, 328: 17
- [12] Morris D J, Hobbs G, Lyne A G, et al. MNRAS, 2002, 335: 275
- [13] Kramer M, Bell J F, Manchester R N, et al. MNRAS, 2003, 342: 1299
- [14] Hobbs G, Faulkner A J, Stairs I H, et al. MNRAS, 2004, 352: 1439
- [15] Faulkner A J, Stairs I H, Kramer M, et al. MNRAS, 2004, 355: 147
- [16] Lorimer D R, Faulkner A G, Manchester R N, et al. MNRAS, 2006, 372: 777
- [17] Smits R, Lorimer D R, Kramer M, et al. A&A, 2009, 505: 919
- [18] Dan H, Pasquale B, Pasquale D S. JCAP, 2009, 01: 025
- [19] Ilias C, Dan H. Phys Rev, 2013, 89: 023013
- [20] Tim L, Stefano P, et al. ApJ, 2013, 772: 18
- [21] Manchester R N, Lyne A G, D'Amico N, et al. MNRAS, 1996, 279: 1235
- [22] Biggs J D. MNRAS, 1990, 245: 514
- [23] D'Amico N. Adv. Space Res, 1998, 21: 125
- [24] Bhat N D R, Cordes J M, Camilo F, Nice D J, Lorimer D R. ApJ, 2004, 605: 759
- [25] Haslam C G T, Salter C J, Stoffel H, et al. Astron. Astrophys. Suppl. Ser, 1982, 47: 143
- [26] Cordes J M, Freire P C C, Lorimer, D R, et al. ApJ, 2006, 637: 446
- [27] Lorimer D R, Stairs I H, Freire P C, et al. ApJ, 2006, 640: 428
- [28] Hessels J W T, Nice D J, Gaensler B M, et al. ApJ 2008, 682: L41
- [29] Deneva J S, Cordes, J M, Mc Laughlin M A, et al. ApJ 2009, 703: 2259
- [30] Knispel B, Allen B, Cordes J M, et al. Science, 2010, 329: 1305
- [31] Knispel B, Lazarus P, Allen B, Anderson D, et al. ApJ, 2011, 732: L1
- [32] Deneva J S, Freire P C C, Cordes J M, et al. ApJ, 2012 757: 89
- [33] Crawford F, Stovall K, Lyne A G, et al. ApJ, 2012, 757: 90
- [34] Nice D J, Altieri E, Bogdanov S, et al. ApJ, 2013, 772: 50
- [35] Barr E D, Champion D J, Kramer M, et al. MNRAS, 2013, 435: 2234
- [36] Keith M J, Jameson A, van Straten W, et al. MNRAS, 2010, 409: 619
- [37] Levin L, Bailes M, Bates S, et al. ApJ, 2010, 721: L33
- [38] Bailes M, Bates S D, Bhalariao V, et al. Science, 2011, 333: 1717
- [39] Keith M J, Johnston S, Bailes M, et al. MNRAS, 2012, 419: 1752
- [40] Bates S D, Bailes M, Barsdell B R, et al. MNRAS, 2012, 427: 1052
- [41] Burgay M, Bailes M, Bates S D, et al. MNRAS, 2013, 433: 259
- [42] Ng C, Bailes M, Bates S D, Bhat N D R, et al. MNRAS, 2014 439: 1865
- [43] Dewey R J, Taylor J H, Weisberg J M. ApJ, 1985, 294: 25
- [44] Johnston S, Lyne A G, Manchester R N, et al. MNRAS, 1992, 255: 401
- [45] Burgay M, D'Amico N, Possenti A, et al. Nature, 2003, 426: 531
- [46] Lyne A G, Burgay M, Kramer M, et al. Science, 2004, 303: 1153
- [47] Burgay M, Joshi B C, D' Amico N, et al. MNRAS, 2006, 368: 283
- [48] Morris D J, Hobbs G, Lyne A G, et al. MNRAS, 2002, 335: 275
- [49] Kramer M, Bell J F, Manchester R N, et al. MNRAS, 2003, 342: 1299
- [50] Hobbs G, Faulkner A, Stairs I H, et al. MNRAS, 2004, 352: 1439
- [51] Faulkner A J, Stairs I H, Kramer M, et al. MNRAS, 2004, 355: 147
- [52] Lorimer D R, Faulkner A J, Lyne A G, et al. MNRAS, 2006, 372: 777
- [53] Keith M J, Eatough R P, Lyne A G, et al. MNRAS, 2009, 395: 837
- [54] Mickaliger M B, Lorimer D R, Boyles J, et al. ApJ, 2012, 759: 127
- [55] Knispel B, Eatough R P, Kim H, et al. ApJ, 2013, 774: 93
- [56] Edwards R T, Balles M, van Straten W, et al. MNRAS, 2008, 389: 1399
- [57] Jacoby B A, Bailes M, van Kerkwijk M H, et al. ApJ, 2003, 599: L99
- [58] Jacoby B A. PhD thesis, California Institute of Technology, 2004

- [59] Jacoby B A, Bailes M, Ord S, et al. *ApJ*, 2009, 699: 2009
- [60] Burke-Spolaor S, Bailes M. *MNRAS*, 2010, 298: 207
- [61] Burgay M, Keith M J, Lorimer D R, et al. *MNRAS*, 2013, 429: 579
- [62] Lorimer D R, Camilo F, McLaughlin M A. *MNRAS*, 2013, 434: 347
- [63] Hulse R A, Taylor J H. *ApJ*, 1975a, 191: L59
- [64] Hulse R A, Taylor J H. *ApJ*, 1975b, 191: L51
- [65] Stokes G H, Segelstein D J, Taylor J H. *ApJ*, 1986, 311: 694
- [66] Nice D J, Fruchter A S, Taylor J H. *ApJ*, 1995, 449: 156
- [67] Wolszczan A. <http://www.cbat.eps.harvard.edu/iauc/05000/05073.html#Item1>, 1990
- [68] Camilo F, Nice D J, Taylor J H. *ApJ*, 1993, 412: L37
- [69] Foster R S, Wolszczan A, Camilo F. *ApJ*, 1993, 410: L91
- [70] Thorsett S E, Deich W T S, Kulkarni S R. *ApJ*, 1993, 416: 182
- [71] Camilo F. PhD thesis, Princeton: Princeton University, 1995
- [72] Foster R S, Cadwell B J, Wolszczan A. *ApJ*, 1995, 454: 826
- [73] Ray P S, Thorett S E, Jenet F A. *ApJ*, 1996, 470: 1103
- [74] Camilo F, Nice D J, Taylor J H. *ApJ*, 1996, 461: 812
- [75] Camilo F, Nice D J, Shrauner J A. *ApJ*, 1996, 469: 819
- [82] Sayer R W, Nice D J, Taylor J H. *ApJ*, 1997, 474: 426
- [77] Lewandowski W, Wolszczan A, Feiler G, et al. *ApJ*, 2004, 600: 905
- [78] Lorimer D R, Xilouris K M, Fruchter A S, et al. *MNRAS*, 2005, 359: 1524
- [79] Denna J S, Stovall K, McLaughlin M A, et al. *ApJ*, 2013, 775: 51
- [80] Damashek M, Taylor J H, Hulse R A. *ApJ*, 1978, 225: 31
- [81] Stokes G H, Haylor J H, Weisberg J M. *Nature*, 1985, 371: 787
- [82] Sayer R W, Nice D J, Taylor J H. *ApJ*, 1997, 474: 426
- [83] Bass C Z, Wang A C, Kaspi V M, eds. *AIP Conf Proc*, 2008, 983: 613
- [84] Rosen R, Swiggum J, McLaughlin M A, et al. *ApJ*, 2012, 768: 85
- [85] Boyles J, Lynch R S, Ransom S M, et al. *ApJ*, 2013, 763: 80
- [86] Lynch R S, Boyles J, Ransom S M, et al. *ApJ*, 2013, 763: 81
- [87] Ransom S M, Stairs I H, Archibald A M, et al. *Nature*, 2014, 505: 520
- [88] Stovall K, Lynch R S, Ransom S M. *ApJ*, 2014, 791: 67
- [89] Davies J G, Lyne A G, Seiradakis J H. *Nature Phys Sci*, 1973, 244: 84
- [90] Vaughan A E, Large M I. *Nature*, 1970, 225: 167
- [91] Manchester R N, Lyne A G, Taylor J H, et al. *MNRAS*, 1978, 185: 409
- [92] Manchester R N, Lyne A G, D'Amico N, et al. *MNRAS*, 1996, 279: 1235
- [93] Lyne A G, Manchester R N, Lorimer D R, et al. *MNRAS*, 1998, 295: 743
- [94] Camilo F, Lyne A G, Manchester R N, et al. *Astron. Soc. Pac*, 2000, 202: 3
- [95] Burke-Spolaor S, Bannister K W. *ApJ*, 2014, 792: 19
- [96] Cordes J M, Joesph T, Lazio W. *A New Model For Galactic Distribution Of Free Electrons And Its Fluctuations*, astro-ph/0207156, 2008
- [97] <http://psrpop.sourceforge.net>, 2015
- [98] <https://github.com/samb8s/PsrPopPy>, 2015
- [99] Reid M J, Menten K M, Zheng X W, et al. *Astrophysical Journal*, 2009, 705: 1548
- [100] Accardo L, Aguilar M, Aisa D, et al. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 121101
- [101] Aharonian F A, Atoyan A M, Volk H J. *A&A*, 1995, 294: L41
- [102] Gao G G, Jiang Z J, Zhang L. *ChJAA*, 2008, 8: 87
- [103] Faucher-Giguere C A, Kaspi V M. *ApJ*, 2006, 643: 332

Progress on Radio Pulsar Survey and Estimate the Neighbor Pulsar Population

ZHANG Lei^{1,2}, WANG Pei², LI Di^{2,3}, ZHANG Jie¹, YUE You-ling^{2,3}, LIU Shu²

(1. China West Normal University, Sichuan 637000, China; 2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 3. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Radio surveys are an important way to detect new pulsars. We first reviewed the main factors affecting sensitivities of pulsar searches in radio bands. These factors can be grouped into two categories. First, the instrumental factors include telescope size, observation frequency, observation bandwidth, integration time, sampling rate, digitization loss, and system temperature. Second, the intrinsic properties of pulsars include dispersion, period, and effective pulse width. We defined a generic detection rate (DR) that combine all these factors to be the number of pulsars detected with specific integration time per pointing.

We summarized the results of all radio pulsar surveys. The most successful pulsar survey so far is Parkes multibeam pulsar survey (PKSMB), which detected 1086 normal pulsars. The PKSMB was expanded by two more surveys, namely, Parkes-Swinburne multibeam survey (PKSSW) and Parkes high-latitude multibeam pulsar survey (PKSHL), which in total detected 1377 normal pulsars.

We utilized the software package PsrPopPy, which adopts a time evolution model of pulsar parameters, to simulate the Galactic pulsar distribution. The results of Parkes multibeam pulsar survey and its two extensions were used as inputs of PsrPopPy to constrain the parameters of pulsar population. The tuned PsrPopPy provided a simulated Galactic pulsar population and its distribution in the Galaxy.

We looked into the impacts of nearby neutron stars on Earth-based high energy physics experiments, particularly those based on positron detections. The excess of positron has been suggested as one evidence for the existence of dark matter. We examined the pulsar population of the solar neighborhood through the PsrPopPy simulations described above. Within 1kpc of the Sun, we predicted that there exist 600 pulsars, 13 of which can be Gamma ray pulsars. This population of nearby high energy pulsars should play an important role in revealing the origin of the rising cosmic ray positron fraction.

Key words: pulsar; pulsar surveys; pulsar simulation