

# 脉冲星参数统计和演化\*

蔡 炎<sup>1,2†</sup> 阿里塔尼<sup>1,2</sup> 赵永恒<sup>1</sup> 张承民<sup>1</sup>

(1 中国科学院国家天文台 北京 100012)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 统计分析了目前发现的几种脉冲星的自转周期和表面磁场以及空间的分布情况, 揭示出毫秒脉冲星比普通射电脉冲星、LMXB (低质量 X 射线双星) 比 HMXB (高质量 X 射线双星) 的空间分布要更加弥散; 孤立毫秒脉冲星自转周期分布的峰值为 4.7 ms, 而普通脉冲星的相应值为 0.6 s, 双星中毫秒脉冲星这一值为 3.5 ms; FERMI 脉冲星 (Fermi Gamma-ray Space Telescope 发现的伽玛射线脉冲星) 和正常脉冲星磁场集中于  $10^{12}$  Gs; 某些年轻的高能脉冲星与超新星遗迹关联. 另外结合脉冲星形成演化模型, 对这些分布特点进行了一定的说明.

**关键词** 脉冲星; 普通, 恒星; 统计, X 射线; 双星

**中图分类号:** P 145; **文献标识码:** A

## 1 引言

脉冲星于 1967 年被 Hewish 等<sup>[1]</sup> 发现后, Gold<sup>[2]</sup> 和 Pacini<sup>[3]</sup> 证明它们是高速旋转的中子星, 其旋转速度逐渐变慢, 减少的动能以辐射的形式损耗掉. 得益于澳大利亚帕克斯多波束射电望远镜的观测<sup>[4-8]</sup>, 近年来发现了大量的脉冲星, 使得脉冲星的研究发展飞速. 由于地球大气对高能粒子的吸收作用, 人们很难在地面上很好地探测高能脉冲信号. 随着 COS-B 卫星<sup>[9]</sup>、CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) 卫星<sup>[10-11]</sup>、RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) 卫星<sup>[12]</sup>、FERMI 卫星<sup>[13]</sup> 等的成功发射, 人们观测高能脉冲信号的能力也越来越强, 越来越多高能脉冲星被发现. 到目前为止, 发现的脉冲星体的总数已经接近 2 000 颗, 而且以每年约 100 颗的数目增长. 这些脉冲星的周期分布范围从 1.4 ms 到 11.8 s<sup>[14]</sup>. 脉冲星是一种极端致密的天体, 有非常强的磁场和引力场, 这就给人们提供了研究极端条件下物理规律的机会. 本文不深入研究脉冲星的物理模型和辐射机制, 而是综合几种脉冲星体的数据, 对其自转周期和表面磁场做一定的统计. 利用统计的结果, 结合脉冲星的模型, 对目前脉冲星的相关理论进行一定的分析. 这里用到了 ATNF Pulsar Catalogue 中的射电脉冲星<sup>[14]</sup>、FERMI 脉冲星<sup>[15-16]</sup>、LMXB<sup>[17]</sup>、HMXB<sup>[18-24]</sup>、磁星 (Magnetar)(软伽玛射线重复暴 (SGR) 和反常 X 射线脉冲星 (AXP))<sup>[14]</sup>、RXTE 观测到的 LMXB<sup>[25-26]</sup> 的数据. 文章组织如下: 首先在第 2 节

2011-03-28 收到原稿, 2011-04-13 收到修改稿

\* 国家自然科学基金项目 (10975046) 资助

† caiyan@lamost.org

给出脉冲星在银道坐标系下的空间分布图, 做简单的说明; 第 3 节对脉冲星的周期分布做详细的统计分析, 对模型为基础的理论推导结果和实际的观测结果的差别进行讨论, 对脉冲星的理论研究提出建议; 第 4 节对脉冲星的表面磁场的分布做详细的拟合, 利用观测结果对脉冲星的演化过程进行探讨, 对未来的脉冲星观测进行展望; 第 5 节对本文做总结.

## 2 脉冲星在银道坐标系中的分布

我们在图 1 中展示了上面提到的几种脉冲星在银道坐标系中的分布. 从图中可以看出, 脉冲星主要还是集中在银道面上, 即恒星聚集的区域. HMXBs 相对于 LMXBs 更集中分布在银道面上, 原因可能是组成 HMXB 的大质量恒星更加集中地分布在银河系的旋臂上<sup>[27]</sup>. 双星和毫秒脉冲星 (周期小于 10 ms) 的分布是最为弥散的. 双星有 40% 是处在球状星团中的<sup>[28]</sup>, 同时它们的年龄都比较大, 已经运行了很长时间, 因而也就比较远离银道面. 毫秒脉冲星分布也很弥散. 毫秒脉冲星现在普遍被认为是老年的脉冲星在双星中再加速得到的<sup>[29–30]</sup>, 它们大多数处在双星中, 所以空间分布与双星的空间分布相似. FERMI 脉冲星也是集中分布在银道面上. 孤立的 FERMI 脉冲星都是非常年轻的脉冲星, 也就是恒星死亡不久后的遗留物, 应该分布在恒星聚集的区域. 可以看到 6 颗毫秒 FERMI 脉冲星 (红色  $\triangle$ ) 的分布偏离银盘比较远, 同样是因为它们主要处在双星中, 与双星空间分布相似.

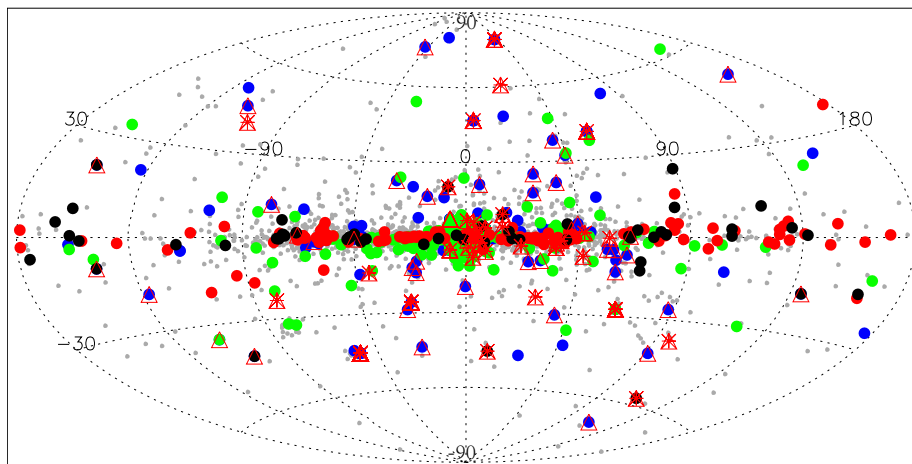


图 1 各种脉冲星在银道坐标系下的空间分布图. 蓝色圆点是双星. 黑色圆点是 FERMI 脉冲星. 红色圆点是 HMXB. 绿色圆点是 LMXB. 红色  $\triangle$  是所有的毫秒脉冲星. 中间有一个红色 “\*” 的红色  $\triangle$  是孤立的毫秒脉冲星

Fig. 1 Spatial distribution of various kinds of pulsars in the Galactic coordinate system. Blue dots represent binaries. Black dots represent FERMI pulsars. Red dots represent HMXBs. Green dots represent LMXBs. Red  $\triangle$ 's represent all millisecond pulsars. Red  $\triangle$ 's with red \*'s represent isolated millisecond pulsars

### 3 脉冲星自转周期的分布

脉冲星是旋转的中子星, 光速圆柱面半径  $R_c = c/\Omega = 5 \times 10^4 P$  km. 这里  $c$  为光速,  $\Omega$  为脉冲星自转的角速度, 单位为 rad/s,  $P$  是脉冲星自转周期, 单位为 s. 孤立的脉冲星因辐射出能量使得转动动能减少从而旋转变慢, 理论上减速率  $\dot{\Omega} = \frac{-4\pi^2 P^{-3} \dot{P}}{\Omega}$ . 我们首先把孤立的普通射电脉冲星、双星中的脉冲星、FERMI 脉冲星、LMXB 中的脉冲星、RXTE 观测到的脉冲星的周期以及磁星的脉冲周期分布画到一张柱状图上 (图 2), 观察它们之间的区别与关系. 其中孤立的普通射电脉冲星有 1 645 颗 (ATNF)<sup>[14]</sup>. 双星有 141 个 (ATNF)<sup>[14]</sup>. FERMI 脉冲星有 54 颗<sup>[15-16]</sup>. LMXB 中的脉冲星中有周期的有 37 颗<sup>[17]</sup>. RXTE 观测到的脉冲星中有周期的有 26 颗, 其中包括 7 颗处在加速阶段的毫秒脉冲星. 这 26 颗 RXTE 脉冲星属于 LMXB, 但不同于普通脉冲星, 它们的自转周期不稳定, 表现出了千赫兹准周期震荡<sup>[31]</sup>, 所以把它们从 LMXB 中单独列出来. 磁星有 13 颗<sup>[14]</sup>.

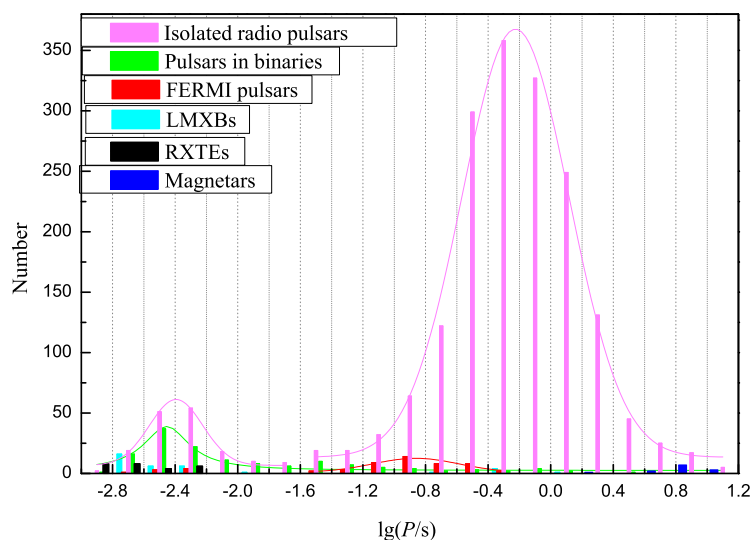


图 2 脉冲星的自转周期分布图. 每个周期间隔内的柱状图的高度代表某种脉冲星在该周期间隔内的数目分布. 彩色曲线代表其对应颜色种类脉冲星的周期分布拟合曲线

Fig. 2 Period distribution of pulsars. The height of the column in one interval represents the number of one kind of pulsars whose periods locate in this interval. Color curves represent the fitted curves of the period distributions corresponding to different kinds of pulsars

#### 3.1 脉冲星周期分布拟合结果分析

下面我们分别讨论各类脉冲星的周期分布. 所有 ATNF Pulsar Catalogue 中的孤立射电脉冲星的周期分布从 1.85 ms 到 8.51 s, 共 1 645 颗, 平均周期为 0.86 s, 且轮廓呈现双峰. 所以我们对其周期以 25 ms 分界, 分别对两侧分布做了拟合. 左边是以孤立的

毫秒射电脉冲星为主, 周期从 1.85 ms 到 21.7 ms, 共 54 颗, 平均周期 5.6 ms. 采用高斯面积拟合, 函数形式为

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} \exp \frac{-2(x - x_c)^2}{w^2}, \quad (1)$$

其中  $y_0$  是偏移量,  $x_c$  是峰值,  $w$  是半高全宽,  $A$  是拟合曲线的面积. 拟合结果中的  $\bar{R}^2$  表示拟合质量的好坏. 拟合结果见表 1 第 1 行. 周期分布的峰值处在 4.7 ms 处, 在  $10^{-2.4} \sim 10^{-2.2}$  s 区间内. 在这个区间内分布有 28 颗毫秒脉冲星. 结果显示孤立的射电毫秒脉冲星的周期主要分布在 1~10 ms 的范围内.

右侧周期大于 25 ms 的以普通孤立射电脉冲星为主, 周期从 26.6 ms 到 8.51 s, 共 1 591 颗, 平均周期 0.89 s. 采用高斯面积拟合, 拟合结果见表 1 第 2 行. 周期分布的峰值处在 0.62 s 处, 在  $10^{-0.4} \sim 10^{-0.2}$  s 区间内. 在这个区间内分布有 351 颗脉冲星. 结果显示普通孤立脉冲星的周期集中在 0.6 s 附近.

下面我们分析双星中脉冲星的周期的分布. ATNF 双星中的射电脉冲星为 141 颗, 脉冲周期从 1.4 ms 到 2.8 s, 平均周期为 90.7 ms. 我们对其整体周期的分布进行高斯面积拟合失败, 进而采用洛伦兹峰值拟合. 拟合函数的形式为

$$y = y_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{w}{4(x - x_c)^2 + w^2}, \quad (2)$$

其中  $y_0$ 、 $x_c$ 、 $w$  和  $A$  的意义同 (1) 式. 拟合结果见表 2. 周期分布的峰值处在 3.5 ms 处, 在  $10^{-2.6} \sim 10^{-2.4}$  s 区间内. 在这个区间内分布有 37 颗毫秒脉冲星. 双星无法采用与普通射电脉冲星一样的高斯面积拟合, 也许是它们形成规律不同的反映. 结果显示双星中的毫秒脉冲星周期集中在 3.5 ms 左右.

FERMI 卫星于 2008 年 6 月 11 日成功发射, 到目前发现了 54 颗  $\gamma$  射线脉冲星<sup>[15-16]</sup>, 其中有 8 颗毫秒脉冲星 (5 颗在双星中). 由于 FERMI 脉冲星中的毫秒脉冲星数据量太少, 无法得到精确的拟合结果, 所以不对它们进行拟合. 我们对 46 颗非毫秒的 FERMI 脉冲星的自转周期进行了拟合. 这 46 颗 FERMI 脉冲星的周期分布从 33.1 ms 到 444 ms, 平均为 166 ms. 采用高斯面积拟合, 拟合结果见表 1 第 3 行. 周期分布峰值处在 0.14 s, 在  $10^{-1.0} \sim 10^{-0.8}$  s 区间内. 在这个区间内分布有 14 颗脉冲星. 拟合精度相对不好, 应该归因于目前的数据量依然很少. 结果显示非毫秒 FERMI 脉冲星的自转周期集中在 0.14 s 左右.

表 1 脉冲星周期分布的高斯面积拟合结果

Table 1 The fitted results of period distributions of pulsars with area version of Gaussian function

	$y_0$	$x_c$	$w$	$A$	$\chi^2$	$\bar{R}^2$
Isolated millisecond radio pulsars	$1.60 \pm 0.60$	$-2.33 \pm 0.01$	$0.25 \pm 0.01$	$8.55 \pm 0.58$	1.315	0.986
Isolated normal radio pulsars	$3.07 \pm 6.84$	$-0.21 \pm 0.01$	$0.69 \pm 0.03$	$309.60 \pm 15.49$	226.914	0.987
Normal FERMI pulsars	$0.96 \pm 3.42$	$-0.86 \pm 0.05$	$0.55 \pm 0.22$	$7.93 \pm 4.89$	5.38123	0.730

表 2 双星中脉冲星周期分布的洛伦兹峰值拟合结果

Table 2 The fitted results of period distributions of pulsars in binaries with Lorentzian peak function

	$y_0$	$x_c$	$w$	$A$	$\chi^2$	$\bar{R}^2$
Pulsars in binaries	$2.43 \pm 0.79$	$-2.46 \pm 0.02$	$0.35 \pm 0.06$	$20.29 \pm 2.50$	8.469	0.895

对于余下的几种有周期参数的脉冲星, 包括 37 颗 LMXB 脉冲星, 26 颗 RXTE 脉冲星, 13 颗磁星, 由于数据量少或者没有明显的分布轮廓, 没有做相应的拟合. 但是从图中可以看出, 26 颗 RXTE 脉冲星全是毫秒脉冲星, 37 颗 LMXB 脉冲星中有 28 颗是毫秒脉冲星. 而且这些毫秒脉冲星的周期分布主要集中在普通毫秒射电脉冲星的左边, 即它们的典型周期比孤立的普通毫秒射电脉冲星的要短. 另外我们有 60 颗处在 HMXB 中的脉冲星的自转周期参数, 但是由于 HMXB 的物理性质相对复杂, 周期分布跨度也非常大, 与上面的脉冲星相差比较大. 所以我们没有把它们和上面的其它脉冲星画在同一幅图中比较. 我们单独画出 HMXB 的周期分布图, 给大家一个直观展示, 如图 3 所示.

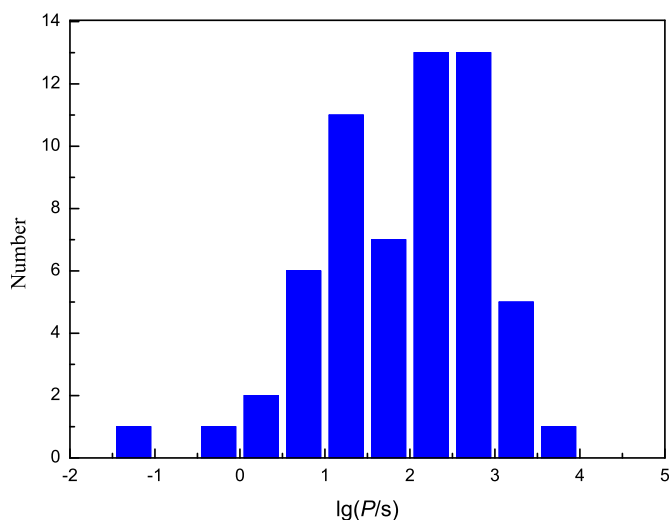


图 3 HMXB 中脉冲星的周期分布

Fig. 3 The period distribution of pulsars within HMXBs

### 3.2 脉冲星周期分布拟合结果讨论

首先我们看一下孤立的毫秒射电脉冲星与双星中的毫秒脉冲星周期分布的区别. 在上一小节看到, 孤立的射电毫秒脉冲星的周期分布峰值在 4.7 ms 左右,  $10^{-2.4} \sim 10^{-2.2}$  s 范围内分布的最多, 有 28 颗. 其中 13 颗有年龄数据, 得到的平均特征年龄 ( $\tau_c = P/(2\dot{P})$ )

为  $7.8 \times 10^9$  yr. 双星中的毫秒脉冲星的周期分布峰值在 3.5 ms 左右, 在  $10^{-2.6} \sim 10^{-2.4}$  s 范围内分布的最多, 有 37 颗. 其中 19 颗有年龄数据, 得到平均年龄为  $1 \times 10^{10}$  yr. 我们从统计结果可以看到, 双星中的毫秒脉冲星的典型周期要比孤立的射电脉冲星的相应周期短一些, 而且特征年龄也大一些. 一般认为毫秒脉冲星是 LMXBs 发展的最终结果, 且 LMXBs 中的中子星是由质量大于  $8 M_{\odot}$  的恒星死亡时塌缩形成的<sup>[32-33]</sup>. LMXBs 中的中子星原本周期较长, 但是它不断地吸积伴星的物质. 伴星物质的角动量使得中子星加速, 周期变短, 最终形成毫秒脉冲星<sup>[29-30]</sup>. 但是有 20% 的毫秒脉冲星是孤立的, 原因还不清楚<sup>[34]</sup>. 孤立毫秒脉冲星的起源一直是极具挑战性的热点问题. 仅仅从拟合结果来看, 这两种毫秒脉冲星的周期和特征年龄并没有明显的差别, 说明它们的形成方式也大致相同, 都经历了一个吸积加速的过程. 孤立的毫秒脉冲星的形成说明有某种机制使双星瓦解<sup>[35-36]</sup>. 要深入细致地研究这个问题还需要更加深入的理论分析和更详尽的脉冲星观测数据.

我们再来对比一下非毫秒的 FERMI 脉冲星与普通孤立的射电脉冲星的周期分布. FERMI 脉冲星周期分布峰值在 0.14 s, 在  $10^{-1.0} \sim 10^{-0.8}$  s 范围内分布的最多, 有 14 颗. 平均特征年龄为  $3.7 \times 10^4$  yr. 普通孤立的射电脉冲星周期分布的峰值在 0.62 s 处, 在  $10^{-0.4} \sim 10^{-0.2}$  s 范围内分布的最多, 有 351 颗. 它们的特征年龄为  $7.9 \times 10^7$  yr. 我们可以看到, FERMI 脉冲星的周期分布与普通射电脉冲星的分布差别很明显, 要比普通射电脉冲星年轻得多. 如果仅以特征年龄的比例来确定 FERMI 脉冲星与普通射电脉冲星的比例, 那么发现 1 000 颗普通脉冲星才可能发现一颗 FERMI 脉冲星. 这显然与观测的结果差了一个数量级. 产生这种现象的原因可能有几种. 一是特征年龄这个参数无法详细地描述脉冲星的产生和演化过程. 二是 FERMI 脉冲星还有别的形成机制, 并不仅仅从恒星死亡塌缩产生. 三, 数目比例相差很大可能是由于观测的选择效应<sup>[37-39]</sup>引起的, 使得观测到的普通射电脉冲星数目没有实际上多. 值得一提的是, 中国国家科教领导小组审议确定的国家九大科技基础设施之一, 500 m 口径球面射电望远镜 (Five-Hundred-Meter Aperture Spherical Radio Telescope, 简称 FAST), 将在 6 yr 后建成<sup>[40]</sup>. FAST 建成后将成为世界上最大口径的射电望远镜. FAST 比德国玻恩 100 m 望远镜灵敏度提高约 10 倍, 与被评为人类 20 世纪十大工程之首的美国 Arecibo 300 m 望远镜相比, 其综合性能提高约 10 倍. 作为世界最大的单口径望远镜, FAST 将在未来 20~30 yr 内保持世界一流设备的地位. 到时发现的射电脉冲星将大大增加, 对脉冲星的研究会有大的促进.

## 4 脉冲星表面磁场的分布

脉冲星的表面磁场是无法直接测量到的. 我们基于目前公认的脉冲星模型, 采用普遍接受的脉冲星磁偶极辐射模型推导出的表面磁场强度  $B_s = \left(\frac{3Ic^3 P \dot{P}}{8\pi^2 R_N^6}\right)^{1/2} = 3.2 \times 10^{19} (P \dot{P})^{1/2}$  Gs, 与 ATNF 的计算方法一致<sup>[14]</sup>. 上式中  $I$  是脉冲星的转动惯量, 假设为  $10^{45}$  g·cm<sup>2</sup>.  $R_N$  是中子星的半径, 取为  $10^6$  cm. 双星中的脉冲星磁场都比较复杂, 因为存在从伴星上吸积物质的过程, 导致快速的欧姆耗散效应, 极大地降低了磁场<sup>[41-43]</sup>. 有些双星由于轨道进动的影响, 很难测到周期导数, 也无法获得基于磁偶极辐射模型的

磁场. 周期导数为负的脉冲星处在吸积加速过程当中, 也无法利用磁偶极辐射模型获得磁场. 基于以上原因, 我们暂不考虑 HMXB 和 LMXB 中脉冲星体的表面磁场的分布. 我们首先把可以得到表面磁场的几种脉冲星的表面磁场分布画在一张柱状图上, 包括 1 521 颗普通射电脉冲星, 97 颗双星中的脉冲星, 54 颗 FERMI 脉冲星以及 12 颗磁星.

#### 4.1 脉冲星表面磁场分布拟合结果分析

上述脉冲星的磁场分布如图 4 所示. 可以通过磁偶极辐射模型得到表面磁场的 ATNF 脉冲星共有 1 521 颗, 磁场分布于  $1.08 \times 10^8 \sim 9.36 \times 10^{13}$  Gs, 平均值为  $2.33 \times 10^{12}$  Gs. 其磁场分布也呈现出双峰, 所以我们也分开拟合, 以磁场强度等于  $10^{10}$  Gs 分界. 由于孤立的毫秒脉冲星的形成原因至今并不清楚, 磁场形成原因也不明确, 而且数据量也很少. 所以我们只是按照磁偶极模型列出磁场, 不对它们进行拟合. 右侧磁场大于  $10^{10}$  Gs 的以普通孤立射电脉冲星为主, 磁场分布于  $1.09 \times 10^{10} \sim 9.36 \times 10^{13}$  Gs, 共 1 494 颗, 平均磁场  $2.37 \times 10^{12}$  Gs. 采用高斯面积拟合, 拟合结果见表 3 第 1 行. 其表面磁场分布的峰值在  $10^{12.09}$  Gs, 在  $10^{12} \sim 10^{12.5}$  Gs 区间内. 在这个区间内分布有 584 颗普通射电脉冲星. 结果显示普通孤立脉冲星的磁场主要在  $10^{12}$  Gs 的数量级上.

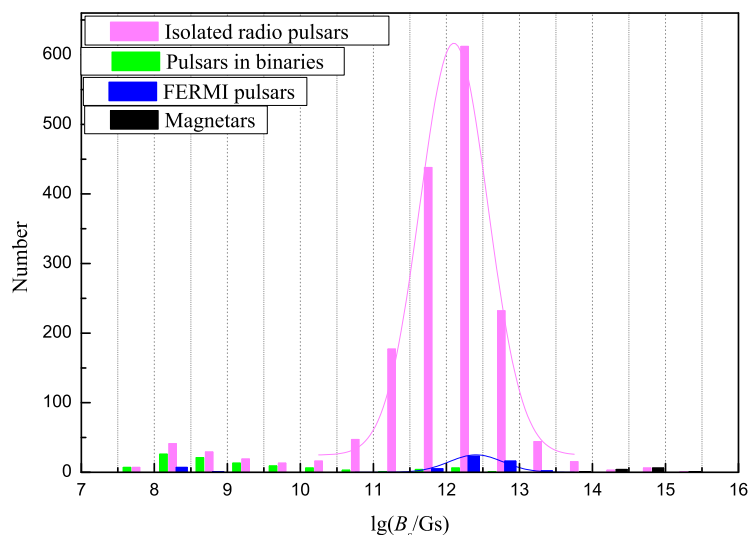


图 4 脉冲星表面磁场强度的分布. 每个磁场强度间隔内的柱状图的高度代表某种脉冲星在该磁场强度间隔内的数目分布. 彩色曲线代表其对应颜色种类脉冲星的表面磁场强度分布拟合曲线

Fig. 4 The surface magnetic field strength distribution of pulsars. The height of the column in one interval represents the number of one kind of pulsars whose surface magnetic field strengthes locate in this interval. Color curves represent the fitted curves of the surface magnetic field strength distributions corresponding to different kinds of pulsars

我们得到了 97 颗双星中的脉冲星的磁场, 它们以毫秒脉冲星为主. 但是, 双星中的

脉冲星的磁场受到多方面的影响, 以磁偶极辐射模型推导出来的表面磁场可能无法准确地反映实际情况. 所以我们也仅仅列出双星当中的脉冲星的磁场分布, 不对它们做进一步的拟合.

下面我们讨论 FERMI 脉冲星的表面磁场分布. 与普通脉冲星一致, FERMI 脉冲星的磁场分布同样呈现双峰. 左侧的 8 个 FERMI 脉冲星为毫秒脉冲星, 且其中 5 个处在双星中. 由于数据量太少, 我们略去毫秒 FERMI 脉冲星, 只对非毫秒的 FERMI 脉冲星的表面磁场分布做拟合. 右侧的 FERMI 脉冲星有 46 颗, 是非毫秒脉冲星, 磁场为  $3.58 \times 10^{11} \sim 1.08 \times 10^{13}$  Gs, 平均为  $3.03 \times 10^{12}$  Gs. 采用高斯面积拟合, 拟合函数结果见表 3 第 2 行. 其表面磁场分布的峰值在  $10^{12.4}$  Gs, 在  $10^{12} \sim 10^{12.5}$  Gs 区间内. 在这个区间内分布有 23 颗 FERMI 脉冲星. 结果显示 FERMI 脉冲星的表面磁场也在  $10^{12}$  Gs 的数量级上.

表 3 脉冲星表面磁场分布的高斯面积拟合结果

Table 3 The fitted results of the surface magnetic field distributions of pulsars with area version of Gaussian function

	$y_0$	$x_c$	$w$	$A$	$\chi^2$	$\bar{R}^2$
Isolated normal radio pulsars	$13.47 \pm 15.31$	$12.09 \pm 0.03$	$0.95 \pm 0.07$	$686.39 \pm 51.83$	915.616	0.979
Normal FERMI pulsars	$-0.02 \pm 0.17$	$12.40 \pm 0.01$	$0.73 \pm 0.01$	$23.07 \pm 0.41$	0.055	0.999

磁星被认为是一种非常年轻的中子星<sup>[44]</sup>, 有着比较特殊的强磁场<sup>[45]</sup>, 它的电磁辐射的能量来自于磁场的衰减<sup>[46]</sup>. 它的性质比较特殊, 数据量也少, 所以也只列出它的表面磁场, 不进一步拟合.

#### 4.2 脉冲星表面磁场分布拟合结果讨论

从图 4 中的拟合函数曲线可以看出, 普通射电脉冲星与 FERMI 脉冲星的表面磁场强度都集中在  $10^{12}$  Gs 这一数量级. 为了更好地观察普通脉冲星的表面磁场与 FERMI 脉冲星和各种不同脉冲星的表面磁场的区别, 我们画出脉冲星表面磁场和周期的关系图. 如图 5 所示.

从图 5 中我们可以看出, 虽然非毫秒 FERMI 脉冲星的年龄要比普通射电脉冲星小两个数量级, 但是它们的表面磁场差别不大. 给人的直观印象是以高能辐射为主的年轻  $\gamma$  射线脉冲星以辐射损耗能量, 自转变慢, 逐渐演化为普通毫秒脉冲星的过程当中, 表面磁场并没有明显的减弱. 这首先可能是因为观测仪器的选择效应<sup>[37-39]</sup>, 使得现有的数据无法体现出实际的脉冲星分布, 进而无法体现出实际上表面磁场的相对关系. 再次可能是因为标准的磁偶极辐射模型不够精细. 这说明在脉冲星演化的过程中, 磁场的变化还需要进一步详细的研究. 另外可以明显地看出来, 某些年轻的高能脉冲星与超新星遗迹是关联在一起的. 这是年轻的脉冲星是由超新星爆发产生的理论的直接体现.

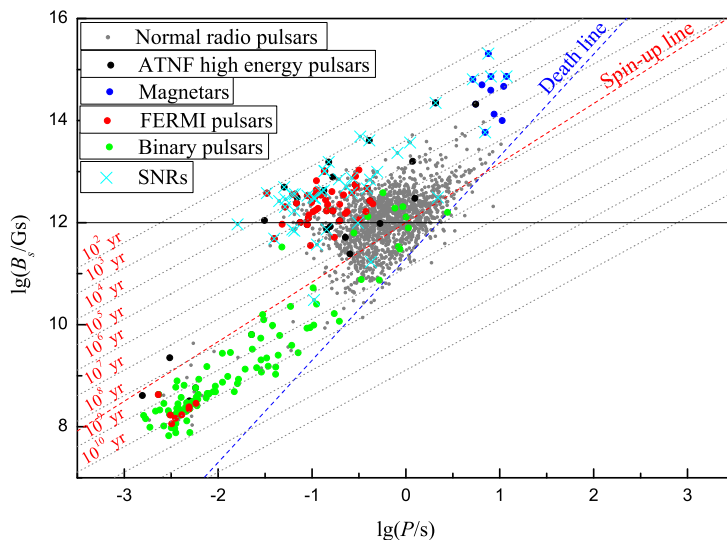


图 5 脉冲星周期与表面磁场强度的关系图. 红色虚线是加速线, 代表在爱丁顿吸积极限的加速下对应的最小周期. 蓝色虚线是死亡线, 当脉冲星的极盖电压小于该线所代表的电压时, 脉冲星将不再发出脉冲信号<sup>[33]</sup>

Fig. 5 The relation between the periods and surface magnetic field strengthes of pulsars. The red dashed line is spin-up line which represents the minimum spin period accelerated under the limit of the Eddington accretion. The blue dashed line is the “death line” corresponding to a polar cap voltage, below which the pulsar activity is likely to switch off<sup>[33]</sup>

## 5 结论

本文对目前发现的几种脉冲星的空间、自转周期和表面磁场的分布情况进行了研究, 结果显示不同种类的脉冲星的这些性质呈现出一定的差异. 由于毫秒脉冲星的年龄比较大, 在银河系中运行时间较长, 所以它们的空间分布要比非毫秒脉冲星更为弥散. 因为构成 HMXB 系统的大质量星主要在银盘的旋臂上形成, 所以 HMXB 要比 LMXB 的分布更接近银道面. 在对不同种脉冲星自转周期进行函数拟合研究中, 发现孤立毫秒脉冲星自转周期分布的峰值为 4.7 ms, 而双星中毫秒脉冲星自转周期分布的峰值为 3.5 ms. 孤立普通射电脉冲星自转周期分布的峰值大约为 0.6 s. FERMI 脉冲星和普通脉冲星磁场都集中于  $10^{12}$  Gs 的事实, 也许可以揭示脉冲星由开始形成的高能阶段演化到后来的射电阶段的过程中, 表面磁场的衰减不大. 某些年轻的高能脉冲星与超新星遗迹相关联是它们产生于超新星爆发的体现.

## 参 考 文 献

- [1] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. *Natur*, 1968, 217: 709
- [2] Gold T. *Natur*, 1968, 218: 731
- [3] Pacini F. *Natur*, 1968, 219: 145
- [4] Manchester R N, Lyne A G, Camilo F, et al. *MNRAS*, 2001, 328: 17
- [5] Edwards R T, Bailes M, van Straten W, et al. *MNRAS*, 2001, 326: 358
- [6] Morris D J, Hobbs G, Lyne A G, et al. *MNRAS*, 2002, 335: 275
- [7] Kramer M, Bell J F, Manchester R N, et al. *MNRAS*, 2003, 342: 1299
- [8] Hobbs G, Faulkner A, Stairs I H, et al. *MNRAS*, 2004, 352: 1439
- [9] Scarsi L, Bennett K, Bignami G F, et al. *ESASP*, 1977, 124: 3
- [10] Hughes E B, Hofstadter R, Rolfe J, et al. *ITNS*, 1980, 27: 364
- [11] Kanbach G, Bertsch D L, Fichtel C E, et al. *SSRv*, 1988, 49: 69
- [12] Bradt H V, Rothschild R E, Swank J H. *A&AS*, 1993, 97: 355
- [13] Atwood W B, Abdo A A, Ackermann M, et al. *ApJ*, 2009, 697: 1071
- [14] Manchester R N, Hobbs G B, Teoh A, et al. *AJ*, 2005, 129: 1993
- [15] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. *ApJS*, 2010, 187: 460
- [16] Saz Parkinson P M, Dormody M, Ziegler M, et al. *ApJ*, 2010, 725: 571
- [17] Ritter H, Kolb U. *A&A*, 2003, 404: 301
- [18] Liu Q Z, van Paradijs J, van den Heuvel E P J. *A&A*, 2006, 455: 1165
- [19] Sakano M, Koyama K, Murakami H, et al. *ApJS*, 2002, 138: 19
- [20] Sood R, Farrell S, O'Neill P, et al. *AdSpR*, 2007, 40: 1528
- [21] Bodaghee A, Courvoisier T J -L, Rodriguez J, et al. *A&A*, 2007, 467: 585
- [22] Naik S, Mukherjee U, Paul B, et al. *AdSpR*, 2009, 43: 900
- [23] Townsend L J, Coe M J, McBride V A, et al. *MNRAS*, 2010, 403: 1239
- [24] Baykal A, Gogus E, Cagdas Inam S, et al. *ApJ*, 2010, 711: 1306
- [25] Linares M, van der Klis M, Altamirano D, et al. *ApJ*, 2005, 634: 1250
- [26] Yin H X, Zhang C M, Zhao Y H, et al. *A&A*, 2007, 471: 381
- [27] Urquhart J S, Moore T J T, Hoare M G, et al. *MNRAS*, 2011, 410: 1237
- [28] Konar S. *MNRAS*, 2010, 409: 259
- [29] Radhakrishnan V, Srinivasan G. *CSci*, 1982, 51: 1096
- [30] Bhattacharya D. *ASPC*, 1996, 105: 547
- [31] van der Klis M. *ARA&A*, 2000, 38: 717
- [32] Bisnovatyi-Kogan G S, Komberg B V. *SvA*, 1974, 18: 217
- [33] Bhattacharya D, van den Heuvel E P J. *PhR*, 1991, 203: 1
- [34] Camilo F, Lyne A G, Manchester R N, et al. *ApJ*, 2001, 548: L187
- [35] van den Heuvel E P J, Bonsdema P T J. *A&A*, 1984, 139: L16
- [36] Verbunt F, van den Heuvel E P J, van Paradijs J, et al. *Natur*, 1987, 329: 312
- [37] Rickett B J. *MNRAS*, 1970, 150: 67
- [38] Lyne A G, Manchester R N. *MNRAS*, 1988, 234: 477
- [39] Lorimer D R. *arXiv:1008.1928*
- [40] Nan R, Peng B, Qiu Y, et al. *IAUS*, 2002, 199: 494
- [41] Konar S, Bhattacharya D. *MNRAS*, 1997, 284: 311
- [42] Cumming A, Arras P, Zweibel E. *ApJ*, 2004, 609: 999
- [43] Jahan Miri M, Bhattacharya D. *MNRAS*, 1994, 269: 455
- [44] Qiao G J, Xu R X, Du Y J. *arXiv:1005.3911*
- [45] Peng Q H, Tong H. *arXiv:0911.2066*
- [46] Thompson C, Duncan R C. *ApJ*, 1996, 473: 322

## Statistics and Evolution of Pulsars' Parameters

CAI Yan<sup>1,2</sup> ALI Taani<sup>1,2</sup> ZHAO Yong-heng<sup>1</sup> ZHANG Cheng-min<sup>1</sup>

(1 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

**ABSTRACT** The period distribution and surface magnetic field strength distribution of pulsars as well as the spatial distribution of pulsars are analyzed statistically. The spatial distribution of millisecond pulsars is more dispersive than that of normal radio pulsars. And the spatial distribution of low-mass X-ray binary pulsars is also more dispersive than that of high-mass X-ray binary pulsars. The peak values of the rotation period distributions of isolated millisecond pulsars, normal radio pulsars and millisecond pulsars in binaries are 4.7 ms, 0.6 s and 3.5 ms, respectively. The surface magnetic field strengths of FERMI pulsars (gamma-ray pulsars observed by Large Area Telescope/Fermi Gamma-ray Space Telescope) and normal pulsars all concentrate in  $10^{12}$  Gs. Combined with the model of the formation and evolution of pulsars, we discuss some characteristics of these distributions. The results show that some young pulsars in the high-energy radiation stage are associated with supernova remnants. This is the direct reflection of the theory that pulsars are formed by supernovae. The results also show that the surface magnetic field strengths of pulsars change a little in the transformation period from the high-energy  $\gamma$ -ray pulsar stage to the normal radio pulsar stage.

**Key words** pulsars: general, stars: statistics, X-rays: binaries