

低能损率射电脉冲星辐射研究*

吴庆东^{1,2†} 王德华^{1,2} 支启军^{1,2} 叶长青^{1,2} 王双强³

(1 贵州师范大学物理与电子科学学院 贵阳 550025)

(2 贵州师范大学贵州省射电天文数据处理重点实验室 贵阳 550025)

(3 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)

摘要 脉冲星辐射理论认为,当中子星旋转磁场产生的感应电场及电压降低,以致不能产生足够多的正负电子对时,其射电辐射将消失,即“死亡”.统计分析了34颗“死亡线”以下源,即低能损率射电脉冲星的空间分布及自转周期等物理性质.首先,这类脉冲星都是场星,与特殊种类脉冲星和高能辐射脉冲星没有明显的相关性;其次,这类脉冲星大多分布在低银纬和距离太阳系较近的区域;再次,这类脉冲星具有较大的特征年龄和较长的自旋周期;最后,这类脉冲星1400 MHz射电光度 L_{1400} 和自转能损率 \dot{E} 弱相关.低能损率射电脉冲星可能是由于星体通过辐射损失能量,导致自转减慢,自转能损率降低至“死亡线”以下.建议对于低能损率射电脉冲星的搜寻,应针对银河系场中年老的、长周期的射电源,而无需针对特殊种类的脉冲星,也无需针对特殊的空间位置.目前我国正在运行的500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)具有较高的灵敏度,有望观测到更多低能损率射电脉冲星.

关键词 脉冲星; 普通, 恒星; 中子, 射电辐射

中图分类号: P162; 文献标识码: A

1 引言

脉冲星(pulsar)是高速自转的中子星(Neutron Star)^[1],其辐射涉及射电、光学、X射线、伽马射线等波段,其中在射电波段共发现约2800颗脉冲星^[2].通常理论认为,脉冲星的射电发射依赖于其磁层环境中正负电子的产生过程^[3-10],即伽马射线光子在脉冲星磁层中,经雪崩放电过程产生大量的高速电子对(洛仑兹因子 $\gamma \sim 10^6$),其减速后的次级粒子($\gamma \sim 10^2 - 10^4$)在磁层中运动,产生射电辐射(曲率辐射或逆康普顿散射)^[5,7,11-12].该理论认为,电子对产生需要足够大的电压,而随着中子星自转减慢,其旋转磁场产生的感应电场及电压降低,当电压降到不能产生足够多电子对时^[13],脉冲星

2018-10-08收到原稿, 2018-11-28收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U1731238、11703003、11565010),贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5726号),贵州省核天体物理与脉冲星科技创新团队(黔科人才团队[2015]4051号),贵州省百层次创新人才项目资助

[†]1778667381@qq.com

的射电辐射将消失, 即“死亡”, 该“熄火电压”进一步推论出脉冲星的射电“死亡线”, 即脉冲星周期 P -周期导数 \dot{P} 图(或周期 P -磁场强度 B 图)中的直线, 以区分脉冲星是否能产生射电辐射^[5,11-12,14-18]. Ruderman等^[5]在1975年(简称RS75)提出了经典的“死亡线”模型, 并认为产生足够多电子对所需电压 $\Delta V \propto B_{12}/P^2 \cong 0.2$ (其中 B_{12} 是以 10^{12} Gs为单位的脉冲星表面磁场强度).

值得注意的是, 脉冲星的射电“死亡线”依赖于理论模型: 首先, 极冠区加速模型——“真空隙”模型或“空间电荷限制流”模型, 会影响加速区可提供的最大电势差 Φ_{\max} ; 其次, 极冠区边界条件以及是否考虑广义相对论惯性系拖曳效应^[19-21], 会影响平行电场分量 E_{\parallel} 的形式; 再次, 中子星表面附近磁场的强度和曲率, 会影响散射伽马射线光子的垂直磁场分量强度; 然后, 主流射电辐射模型——曲率辐射或逆康普顿散射, 会影响伽马射线光子的典型能量; 最后, 脉冲星辐射区磁场结构、磁倾角大小、中子星物态(质量-半径关系)等, 也会影响“死亡线”的位置. 因此, 脉冲星射电信号的消失应该是带状的“死亡谷”, 而非“死亡线”^[14].

图1显示了ATNF (Australia Telescope National Facility)数据库¹中2638颗不同种类脉冲星的 P - \dot{P} 分布. 其中还显示了RS75定义的“死亡线”, 从图中可以看出“死亡线”以下源均属于正常脉冲星. 理论上, “死亡线”下方不应该观测到射电脉冲星. 然而, 1970至2018年, 观测共发现34颗射电脉冲星越过了“死亡线”. 特别是1999年Young等人发现了射电脉冲星PSR J2144-3933, 其自转周期为 $P = 8.5$ s, 远超出了传统的“死亡谷”范围^[22], 挑战了脉冲星射电辐射理论. 此后, 一些作者基于不同的模型假设, 试图解释这颗脉冲星的射电辐射^[23-26].

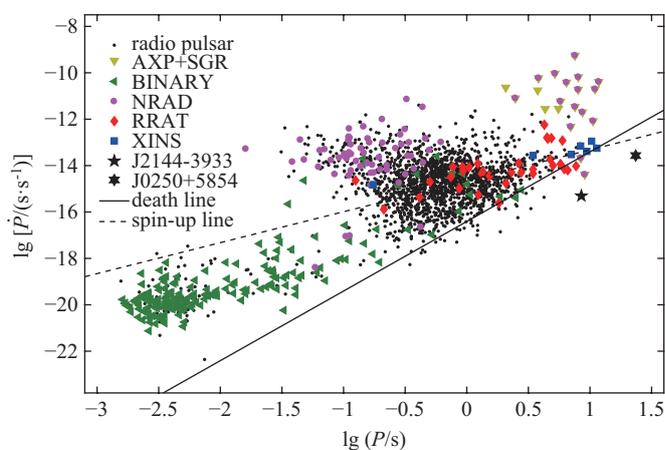


图1 射电脉冲星 P - \dot{P} 图, 实线为RS75定义的死亡线. AXP+SGR: 异常X射线脉冲星或软伽马射线重复爆发脉冲星. BINARY: 有一个或多个伴星的脉冲星. NRAD: 仅在红外或更高频率. XINS: 具有热X射线辐射但没有可探测的射电辐射的孤立中子星. RRAT: 具有间歇性射电脉冲的脉冲星

Fig. 1 P - \dot{P} diagram of the radio pulsar. The straight line is the death line defined by RS75. AXP+SGR: the Anomalous X-ray Pulsar or Soft Gamma-ray Repeater with detected pulsations. BINARY: the pulsar has one or more stellar companion(s). NRAD: the spin-powered pulsar with a pulsed emission only at infrared or higher frequencies. XINS: the isolated neutron stars with a pulsed thermal X-ray emission but no detectable radio emission. RRAT: the pulsars with an intermittently pulsed radio emission

¹<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

目前我国正在运行的500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)具有较高的灵敏度, 对于暗弱源的观测具有较大优势, 因此利用其对“死亡线”以下射电脉冲星进行搜寻, 能够促进脉冲星射电辐射的理论研究. 本文旨在分析“死亡线”以下射电脉冲星的空间分布及自旋周期等物理性质, 为FAST等射电望远镜的进一步脉冲星搜寻工作提供观测统计参考. 本文的结构如下: 第2节介绍经典“死亡线”的理论; 第3节比较分析34颗“死亡线”以下射电脉冲星的空间分布、自转周期、表面磁场强度等分布; 第4节是讨论和结论.

2 死亡线

本文采用RS75定义的脉冲星射电“死亡线”, 即当加速区产生足够多初级电子对所需电势差 ΔV 大于脉冲星可提供的最大电势差 Φ_{\max} 时, 脉冲星射电辐射将会消失^[12]. 假设中子星表面为稳定中子星大气良导体, 带电粒子应处于电磁平衡状态^[3], 即

$$\mathbf{E} + \frac{1}{c}(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B} = 0, \quad (1)$$

其中 \mathbf{E} 是感应电场强度, $\boldsymbol{\Omega}$ 是星体自转角速度, \mathbf{r} 是磁矢距, c 是真空中光速. 由方程(1)推导得 $E = \Omega r B/c$, 将其对 r 积分得到中子星表面两点的电势差 $\Phi = \Omega r^2 B/(2c)$, 再将 $r \approx R \sin\theta$ 代入, 其中 R 是中子星半径, θ 为球面两点对中子星的夹角, 得到

$$\Phi = \frac{\Omega B (R \sin\theta)^2}{2c}. \quad (2)$$

根据极冠区对中子星的夹角关系 $\sin\theta_p = (R/R_{\text{LC}})^{1/2}$, 其中 $R_{\text{LC}} = cP/(2\pi)$ 是光速圆柱半径, θ_p 为开放磁力线的张角. 将其代入方程(2)得出极冠区最大的电势差为

$$\Phi_{\max} = \frac{4\pi^2 R^3 B}{2c^2 P^2} \propto \frac{B}{P^2} \propto \sqrt{\dot{E}}, \quad (3)$$

其中 $\dot{E} = B^2 \Omega^4 R^6 / (2c^3)$ 是脉冲星自转能损率. RS75定义脉冲星的射电“死亡线”为 $B_{12}/P^2 \approx 0.2$ ^[5], 该“死亡线”对应的自转能损率为 $\dot{E} = 1.5 \times 10^{30} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 低于该值的源被称为“低能损率射电脉冲星”.

3 低能损率射电脉冲星空间分布及物理性质

本文分析低能损率射电脉冲星的空间分布及物理性质. 数据上, 考虑到低能损率射电脉冲星均是正常脉冲星. 因此, 本文收集了ATNF数据库中1862颗正常射电脉冲星($P > 30 \text{ ms}$)的相关数据, 包括空间坐标、特征年龄、自转周期、表面磁场强度、1400 MHz射电光度、自转能损率等. 理论上, RS75定义的射电“死亡线”所对应的脉冲星自转能损率为 $\dot{E} = 1.5 \times 10^{30} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$. 我们发现样本中34颗源的 \dot{E} 低于该临界值($\dot{E} = 3.2 \times 10^{28} - 1.4 \times 10^{30} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $\langle \dot{E} \rangle = 7.6 \times 10^{29} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$), 即低能损率射电脉冲星. 这34颗源均是场星, 其中1颗源位于双星系统(PSR J1822-0848)中, 3颗源属于RRAT (PSR J1652-4406、PSR J1840-1419和PSR J1226-3223), 从图1可以看出这些源与其他特殊脉冲星, 如高能辐射脉冲星, 没有明显的相关性. 表1列出了这34颗源的自转周期 P 、中子星表面磁场强度 B 和自转能损率 \dot{E} 的值.

表 1 低能损率射电脉冲星
Table 1 The radio pulsars with a low spin-down power

PSR	P/s	B/Gs	$\dot{E}/(\text{erg} \cdot \text{s}^{-1})$	PSR	P/s	B/Gs	$\dot{E}/(\text{erg} \cdot \text{s}^{-1})$
J2144-3933	8.5	2.08×10^{12}	3.2×10^{28}	J1232-4742	1.9	1.64×10^{11}	8.4×10^{28}
J0343-3000	2.6	3.89×10^{11}	1.3×10^{29}	J1503+2111	3.3	6.89×10^{11}	1.5×10^{29}
J1210-6550	4.2	1.37×10^{12}	2.2×10^{29}	J0919-6040	1.2	1.12×10^{11}	2.2×10^{29}
J2136-1606	1.2	1.42×10^{11}	3.4×10^{29}	J1801-1855	2.6	6.90×10^{11}	4.3×10^{29}
J1333-4449	0.3	1.38×10^{10}	5.2×10^{29}	J0457-6337	2.5	7.33×10^{11}	5.3×10^{29}
J0656-2228	1.2	1.83×10^{11}	5.7×10^{11}	J1915+0752	2.1	5.41×10^{11}	6.3×10^{29}
J1638-4344	1.1	1.69×10^{11}	7.0×10^{29}	J1320-3512	0.5	2.99×10^{10}	7.8×10^{29}
J1805-2447	0.7	6.28×10^{10}	7.9×10^{29}	J1652-4406	7.7	8.66×10^{12}	8.2×10^{29}
J1901+1306	1.8	4.96×10^{11}	8.4×10^{29}	J1840-1419	6.6	6.54×10^{12}	8.7×10^{29}
J1954+2923	0.4	2.73×10^{10}	8.7×10^{29}	J0323+3944	3.0	1.40×10^{12}	9.0×10^{29}
J1710-2616	1.0	1.40×10^{11}	9.1×10^{29}	J1951+1123	5.1	3.98×10^{12}	9.1×10^{29}
J1806-1920	0.9	1.24×10^{11}	9.9×10^{29}	J1822-0848	2.5	1.02×10^{12}	1.0×10^{30}
J1717-3953	1.1	1.92×10^{11}	1.0×10^{30}	J1843+2024	3.4	1.90×10^{12}	1.0×10^{30}
J0156+3949	1.8	5.30×10^{11}	1.0×10^{30}	J1700-3919	0.6	5.37×10^{10}	1.1×10^{30}
J1226-3223	6.2	6.69×10^{12}	1.2×10^{30}	J1834-1202	0.6	6.49×10^{10}	1.2×10^{30}
J1901+0621	0.8	1.24×10^{11}	1.2×10^{30}	J1641-2347	1.1	2.14×10^{11}	1.2×10^{30}
J1625-4048	2.4	1.03×10^{12}	1.3×10^{30}	J0932-3217	1.9	7.03×10^{11}	1.4×10^{30}

3.1 空间分布

我们收集了ATNF数据库中1862颗正常射电脉冲星(包括34颗低能损率射电脉冲星和1828颗其他正常射电脉冲星)的银经、银纬和银道面坐标(XX, YY)数据,分析这些源的空间分布.首先,从图2的银道坐标分布可以看出,低能损率射电脉冲星和其他正常射电脉冲星,均在低银纬(银盘)处($< \pm 30^\circ$)有集中分布的现象.其中,34颗低能损率射电脉冲星的银纬范围是 -52° - 59° ,包括29颗源集中在低银纬 -15° - 30° 处,5颗源位于中等银纬 $\pm(30^\circ - 60^\circ)$ 处.经Kolmogorov-Smirnov (K-S)检验发现,低能损率射电脉冲星和其他正常射电脉冲星的银纬分布,以95%的置信水平判定是一致的(见表2).其次,图3显示了这些源的银道面分布,其中横纵坐标分别是银道面坐标分量XX、YY,银心坐标为(0, 0),太阳坐标为(0, 8.5 kpc).从图中可以看出,低能损率射电脉冲星和其他正常射电脉冲星的分布均集中在太阳系附近.其中,在34颗低能损率脉冲星中有31颗源距离太阳系较近,3颗源(PSR J1801-1855、PSR J1806-1920、PSR J1700-3919)距离太阳较远,距离分别是20.10 kpc、12.76 kpc、11.66 kpc.

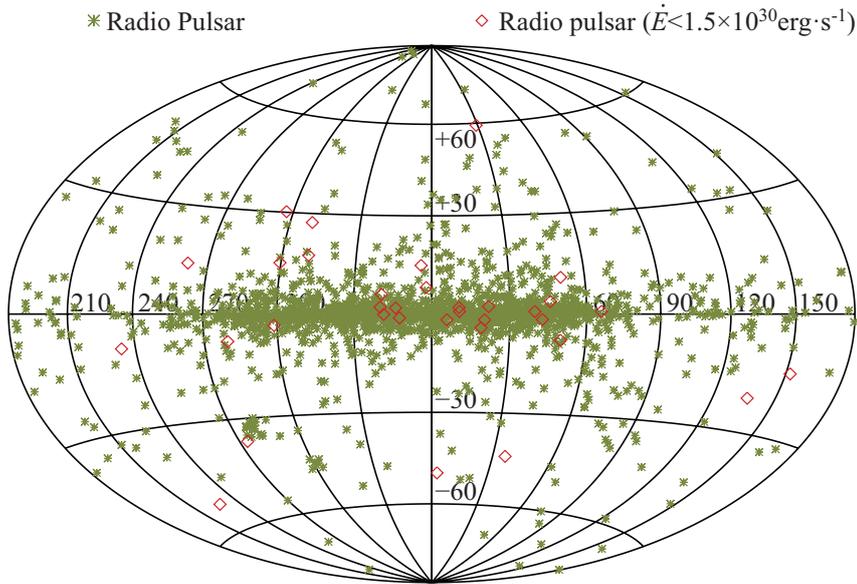


图 2 正常射电脉冲星空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of the normal radio pulsars

表 2 K-S检验结果^a
Table 2 K-S test results^a

Parameter	Classification	Number	p -value	h
$GL^b/^\circ$	Radio pulsar with low spin-down power	34	2.75×10^{-1}	0
	Normal radio pulsar	1828		
τ/yr	Radio pulsar with low spin-down power	34	7.87×10^{-31}	1
	Normal radio pulsar	1828		
τ/yr	Radio pulsar with low spin-down power	34	3.52×10^{-11}	1
	Millisecond radio pulsar	209		
P/s	Radio pulsar with low spin-down power	34	3.26×10^{-8}	1
	Normal radio pulsar	1828		

^a The null hypothesis is that the two groups of data are from the same continuous distribution. And h is 1 if the test rejects the null hypothesis at the 5% significance level, and 0 otherwise.

^b Galactic longitude

3.2 特征年龄、自转周期和表面磁场强度分布

通常认为, 脉冲星在诞生初期自转周期一般在几十毫秒之内, 随后星体由于辐射损失能量, 自转减慢. 根据该理论, 我们分析低能损率射电脉冲星的特征年龄、自旋周期和表面磁场强度的分布.

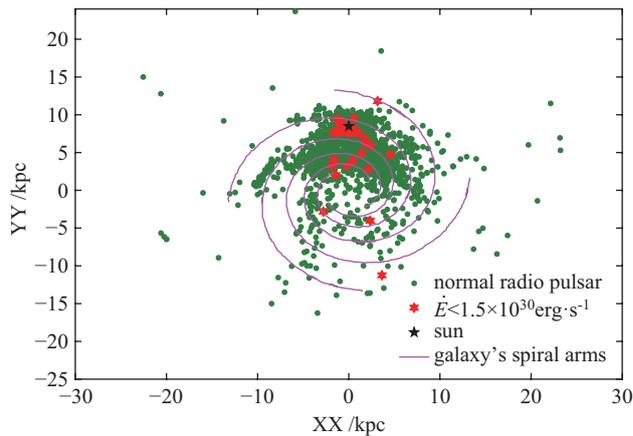


图 3 正常射电脉冲星银道面分布

Fig. 3 The galactic plane distribution of the normal radio pulsars

首先, 我们分析了ATNF数据库中1862颗正常射电脉冲星和209颗毫秒脉冲星特征年龄($\tau \equiv P/2\dot{P}$)的分布. 正常射电脉冲星中, 34颗低能损率射电脉冲星特征年龄分布范围在 $1.29 \times 10^7 - 1.01 \times 10^{10}$ yr, 平均值为 $\langle \tau \rangle = 1.06 \times 10^9$ yr, 1828颗其他正常脉冲星特征年龄范围是 $1.26 \times 10^3 - 8.96 \times 10^{10}$ yr, 平均值为 $\langle \tau \rangle = 1.75 \times 10^8$ yr. 经K-S检验发现, 这两类源特征年龄的分布, 以95%的置信水平判定是不一致的(见表2). 此外, 209颗毫秒脉冲星特征年龄范围是 $2.55 \times 10^7 - 9.41 \times 10^{10}$ yr, 平均值为 $\langle \tau \rangle = 7.17 \times 10^9$ yr. 经K-S检验发现, 这些毫秒脉冲星与34颗低能损率射电脉冲星的特征年龄分布, 以95%的置信水平判定是不一致的(见表2). 图4显示了这些源特征年龄的分布, 可以看出, 低能损率射电脉冲星与其他正常射电脉冲星相比, 具有较大的平均特征年龄. 值得注意的是, 特征年龄并不代表真实年龄(如标准源Crab的真实年龄比特征年龄小30%), 而真实年龄一般比特征年龄小. 此外, 毫秒脉冲星由于经历了吸积加速过程, 其特征年龄比正常脉冲星的特征年龄更不可靠.

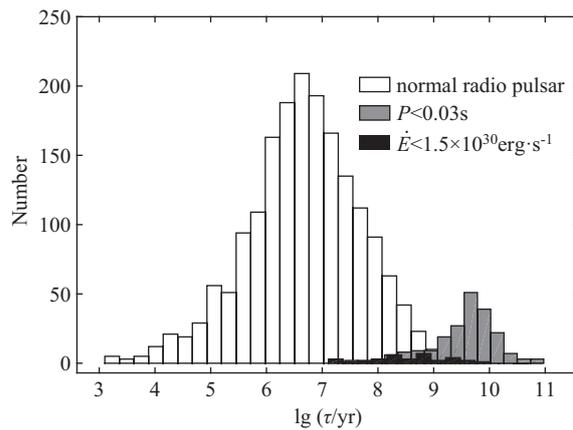


图 4 正常射电脉冲星特征年龄分布

Fig. 4 Characteristic age distribution of the normal radio pulsars

其次, 我们分析了1862颗正常射电脉冲星自转周期的分布. 其中, 34颗低能损率射电脉冲星的自转周期范围是34.56 ms – 8.51 s, 平均值为 $\langle P \rangle = 2.44$ s, 1828颗其他正常脉冲星自转周期范围是30.53 ms – 7.73 s, 平均值为 $\langle P \rangle = 0.83$ s. 经K-S检验发现, 这两类源自转周期的分布, 以95%的置信水平判定是不一致的(见表2). 图5显示了这些源自转周期的分布, 可以看出, 低能损率射电脉冲星与其他正常射电脉冲星相比, 具有较大的平均自转周期.

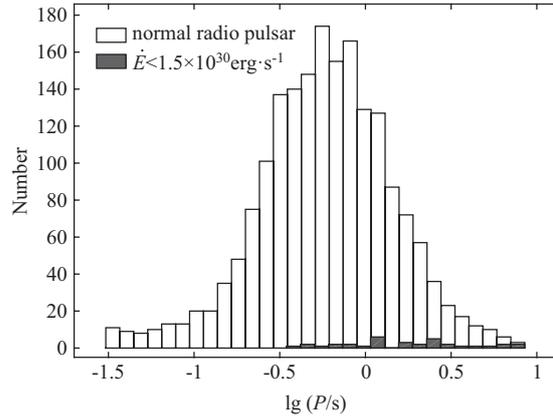


图 5 正常射电脉冲星自转周期分布

Fig. 5 Spin period distribution of the normal radio pulsars

最后, 我们分析了这些源中子星表面偶极磁场强度($B \approx 3.2 \times 10^{19} \sqrt{P\dot{P}}$ Gs)的分布. 其中, 34颗低能损率射电脉冲星表面磁场强度范围是 $1.38 \times 10^{10} - 8.66 \times 10^{12}$ Gs, 平均值为 $\langle B \rangle = 1.21 \times 10^{12}$ Gs, 1828颗其他正常脉冲星表面磁场范围是 $4.42 \times 10^8 - 2.60 \times 10^{14}$ Gs, 平均值为 $\langle B \rangle = 2.72 \times 10^{12}$ Gs. 图6显示了这些源中子星表面磁场强度分布, 可以看出, 低能损率射电脉冲星和其他正常射电脉冲星的中子星表面磁场强度分布相似, 没有明显的差异.

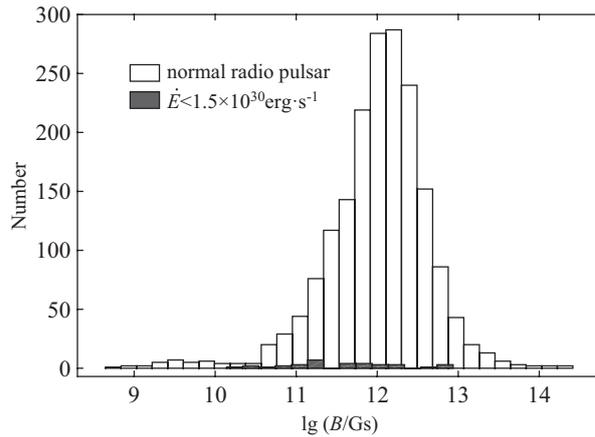


图 6 正常射电脉冲星表面磁场强度分布

Fig. 6 Surface magnetic field strength distribution of the normal radio pulsars

3.3 射电光度与自转能损率关系

从第2节可知 $\dot{E} = B^2 \Omega^4 R^6 / (2c^3) \propto B^2 P^{-4}$, 而经典“死亡线”(RS75)为 $B_{12} / P^2 \approx 0.2$, 这表明脉冲星是否发射射电辐射与其自转能损率有关. 我们收集ATNF中1604颗正常射电脉冲星(包括23颗低能损率射电脉冲星和1581颗其他正常射电脉冲星)、49颗伽马射线脉冲星、153颗毫秒脉冲星(周期小于0.03 s)的1400 MHz射电光度(L_{1400} , 单位为 $\text{m} \cdot \text{Jy} \cdot \text{kpc}^2$), 并乘以Parkes射电望远镜在该频率的频带宽度($\sim 288 \text{ MHz}$), 将其单位换算为 $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 进而分析这些源1400 MHz光度和自转能损率的关系. 其中, 23颗低能损率射电脉冲星 L_{1400} 分布范围是 $5.5 \times 10^{23} - 6.3 \times 10^{27} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $\langle L_{1400} \rangle = 7.2 \times 10^{26} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 1581颗正常脉冲星 L_{1400} 分布范围是 $2.7 \times 10^{23} - 1.7 \times 10^{29} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $\langle L_{1400} \rangle = 1.5 \times 10^{27} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 153颗毫秒脉冲星 L_{1400} 分布范围是 $2.7 \times 10^{23} - 4.4 \times 10^{27} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $\langle L_{1400} \rangle = 2.1 \times 10^{26} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 49颗伽马射线脉冲星 L_{1400} 分布范围是 $2.7 \times 10^{23} - 2.9 \times 10^{27} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $\langle L_{1400} \rangle = 3.2 \times 10^{26} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$.

图7显示了射电脉冲星 L_{1400} 与 \dot{E} 的关系. 可以看出, 正常脉冲星、毫秒脉冲星和伽马射线脉冲星的该分布非常弥散, 没有明显的成团性或相关性. 实际上, 这3类源的一个 \dot{E} 值, 其对应的 L_{1400} 值能够跨越4-6个量级. 为方便对比, 我们计算了这些源 L_{1400} 与 \dot{E} 的比值 $R \equiv L_{1400} / \dot{E}$. 其中, 23颗低能损率射电脉冲星该比值范围是 $9.8 \times 10^{-7} - 1.2 \times 10^{-2}$, 平均值为 $\langle R \rangle \sim 1.1 \times 10^{-3}$, 1581颗正常射电脉冲星该比值范围是 $2.0 \times 10^{-13} - 2.4 \times 10^{-2}$, 平均值为 $\langle R \rangle \sim 3.9 \times 10^{-5}$. 图8显示了这些源比值 R 的分布, 可以看出, 低能损率射电脉冲星与正常射电脉冲星相比, 具有较大的比值 R . 特别是远距离的3颗低能损率射电脉冲星 PSR J1801-1855、PSR J1806-1920和 PSR J1700-3919 (见3.1节), 比值 R 分别为 1.2×10^{-2} 、 6.3×10^{-3} 和 7.8×10^{-4} .

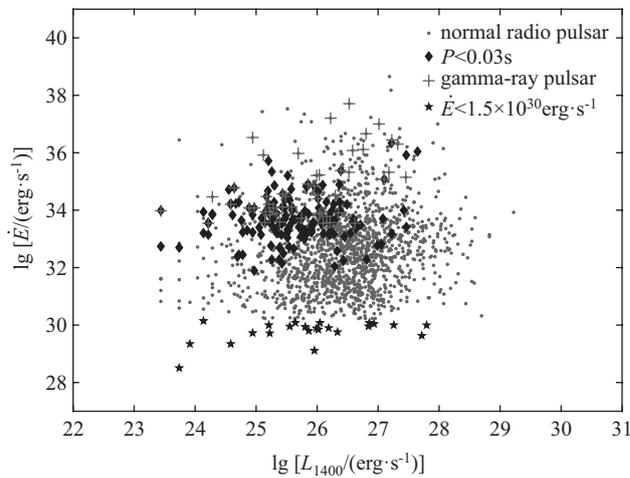


图7 正常射电脉冲星自转能损率与1400 MHz射电光度关系

Fig. 7 The relationship between the spin energy loss rate and radio luminosity at 1400 MHz of the normal radio pulsars

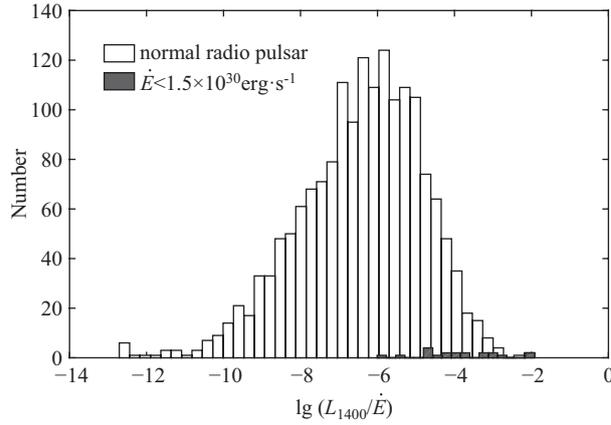


图 8 正常射电脉冲星1400 MHz光度与自转能损率比值分布

Fig. 8 The distribution of the ratio between the 1400 MHz luminosity and the spin energy loss rate of the normal radio pulsars

4 讨论和结论

作为目前灵敏度最高的射电望远镜, FAST将协助天文学家开启更多科学研究^[27]. FAST望远镜接收面积是阿雷西博望远镜的2倍多, 而且拥有更宽的天区覆盖^[28]. 高灵敏度和大天区覆盖使FAST成为探测远距离脉冲星的微弱射电信号的强大工具^[27]. 历史上, Parkes多波束巡天后(灵敏度提高), 发现了大量暗弱的脉冲星, 到目前为止, 绝大多数低能损率射电脉冲星(30/34)是由Parkes发现的. 而FAST安装19波束接收器后, 具有更高灵敏度(L-Band: $A/T \sim 2000 \text{ m}^2/\text{K}$), 频率覆盖范围更宽(70 MHz–3 GHz^[29]). 其科学目标之一是搜寻脉冲星^[29], 而且相比其他望远镜, FAST在搜寻暗弱脉冲星方面具有更大优势. 同时, 随着低能损率、长周期脉冲星PSR J2144–3933和PSR J0250+5854的发现, 传统的死亡线和死亡谷不再适用, 这对脉冲星射电辐射机制发起了挑战. 因此, FAST对低能损率射电脉冲星的观测, 将对脉冲星射电辐射理论的发展具有重要的意义.

通常理论认为, 当脉冲星旋转磁场产生的感应电场及电压降低, 以致不能产生足够的正负电子对时, 其射电辐射将消失, 即“死亡”. 本文分析34颗“死亡线”以下源, 即低能损率射电脉冲星的空间分布及自旋周期等物理性质, 为FAST等射电望远镜的进一步脉冲星搜寻工作提供观测统计参考. 详细的讨论和结论如下:

种类上, 34颗低能损率射电脉冲星都是场星, 其中1颗源处于双星系统(PSR J1822–0848), 3颗源属于旋转射电暂现源(PSR J1652–4406、PSR J1840–1419和PSR J1226–3223), 其余源与其他特殊种类的脉冲星没有明显相关性(见图1). 特别是低能损率射电脉冲星与高能辐射脉冲星(红外至更高能辐射)无关. 因此, 低能损率射电脉冲星是一类仅涉及射电辐射的正常脉冲星, 与其他高能辐射脉冲星和球状星团脉冲星等无关. 物理性质上, 低能损率射电脉冲星和其他正常射电脉冲星相比较, 具有较大的特征年龄(见图4)和较长的自旋周期(见图5), 其中子星表面磁场强度分布与其他正常射电脉冲星相似(见图6). 理论上, 根据关系 $\tau \equiv P/(2\dot{P})$ 和 $\dot{E} \propto B^2 P^{-4}$, 随着年龄的增加, 脉冲星通过辐射损失能量, 自转减慢, 其自转能损率将降低至“死亡线”以

下. 最近, LOFAR (Low-Frequency Array) 刚刚发现了一颗低能损率射电脉冲星—PSR J0250+5854^[30](见图1), 它也是目前已知的周期最长的射电脉冲星($P \sim 23.5$ s), 其银纬是 -0.5° , 距离是1.6 kpc, 偶极表面磁场强度、特征年龄和自转能损率分别为 2.6×10^{13} Gs、13.7 Myr和 8.2×10^{28} erg·s⁻¹. 该源的空间分布和物理性质均符合本文分析的低能损率射电脉冲星的性质. 综上所述, 对于低能损率射电脉冲星的搜寻, 我们建议搜寻银河系场中年老的、长周期的射电源.

(2)空间分布上, 低能损率射电脉冲星和其他正常射电脉冲星有着相似的空间分布, 即集中在低银纬($-30^\circ - 30^\circ$, 见图2), 及距离太阳系较近处(见图3). 脉冲星1400 MHz的射电光度 L_{1400} 和射电流量 F_{1400} 满足以下关系:

$$L_{1400} \propto d^2 \times F_{1400}, \quad (4)$$

其中 d 是脉冲星的距离, F_{1400} 是直接观测量, 取决于射电望远镜灵敏度. 低能损率射电脉冲星和其他正常射电脉冲星的 L_{1400} 分布范围相似, 则根据公式(4), 距离 d 越近的脉冲星流量 F_{1400} 越大, 越容易被观测到. 远距离射电脉冲星不容易被观测到的另一个可能原因是, 以银河系核球为中心, 与太阳系相对称的远距离区域, 由于核球的遮挡作用, 较难观测到射电脉冲星, 低能损率射电脉冲星和其他正常射电脉冲星空间分布相似, 因此, 我们建议对低能损率射电脉冲星的搜寻, 无需指定特殊的空间位置.

(3)低能损率射电脉冲星和其他正常射电脉冲星具有相似的 L_{1400} 分布范围, 且两类源的 L_{1400} 和 \dot{E} 均为弱相关(见图7). 例如, 样本中PSR J1400-1431具有最小射电光度 $L_{1400} = 2.7 \times 10^{23}$ erg·s⁻¹, 而其自转能损率可高达 $\dot{E} = 9.7 \times 10^{33}$ erg·s⁻¹. 作为对比, 样本中PSR J1644-4559具有最大射电光度 $L_{1400} = 1.7 \times 10^{29}$ erg·s⁻¹, 而其自转能损率也仅为 $\dot{E} = 8.4 \times 10^{33}$ erg·s⁻¹. 为进一步检验以上结论, 我们还分析了ATNF数据库中757颗射电脉冲星的400 MHz射电光度 L_{400} 和 \dot{E} 的关系, 发现它们也呈弱相关. 这说明, 低能损率射电脉冲星和其他正常射电脉冲星的差异, 仅是 \dot{E} 不同, 即低能损率射电脉冲星比例参数 $R \equiv L_{1400}/\dot{E}$ 的分布, 明显高于其他正常射电脉冲星(见图8). 同时, 这也说明低能损率射电脉冲星能够产生可探测到的射电光度或射电流量, 例如, PSR J1801-1855具有较小的 $\dot{E} = 3.4 \times 10^{29}$ erg·s⁻¹和相对较大的 $L_{1400} = 5.20 \times 10^{27}$ erg·s⁻¹. 而高能损率射电脉冲星也可能产生比较低的射电光度, 例如, PSR J2322-2650具有较大的 $\dot{E} = 5.5 \times 10^{32}$ erg·s⁻¹和较小的 $L_{1400} = 2.7 \times 10^{23}$ erg·s⁻¹. 这些结论暗示将来可能观测到更低自转能损率的射电脉冲星(\dot{E} 量级在 $\sim 10^{27}$ erg·s⁻¹). 目前我国正在运行的FAST射电望远镜具有较高的灵敏度, 能够探测到更低的射电流量, 因此有望观测到更多低能损率射电脉冲星. 除此之外, L_{1400} 和 \dot{E} 的弱相关性, 也暗示自转能损率并不是决定脉冲星射电“死亡线”的唯一因素, 其可能与其他未知因素共同决定脉冲星的射电辐射. 同时, 若脉冲星是否发射射电辐射决定于“熄火电压”, 而该“熄火电压”并非由脉冲星自转能损率唯一决定, 那么RS75的脉冲星辐射模型需要进一步改进.

参考文献

- [1] 张承民, 王培, 杨佚沿. 科技导报, 2017, 35: 12
- [2] 王双强, 王娜, 张承民, 等. 天文学进展, 2018, 36: 1
- [3] Goldreich P, Julian W H. ApJ, 1969, 157: 869
- [4] Sturrock P A. ApJ, 1971, 164: 529
- [5] Ruderman M A, Sutherland P G. ApJ, 1975, 196: 51
- [6] Melrose D B. ApJ, 1978, 225: 557
- [7] Qiao G J, Lin W P. A&A, 1998, 333: 172
- [8] Machabeli G Z, Usov V V. SvAL, 1979, 5: 238
- [9] Cheng A F, Ruderman M A. ApJ, 1980, 235: 576
- [10] Beskin V S, Gurevich A V, Istomin Y N. Ap&SS, 1988, 146: 205
- [11] Arons J, Scharlemann E T. ApJ, 1979, 231: 854
- [12] Arons J. General Relativistic Polar Particle Acceleration and Pulsar Death//Shibazaki N, Kawai N, Shibata S, et al. Neutron Stars and Pulsars. Tokyo: Universal Academy Press, 1998: 339
- [13] van den Heuvel E P J. Science, 2006, 312: 539
- [14] Chen K Y, Ruderman M A. ApJ, 1993, 402: 264
- [15] Rudak B, Ritter H. MNRAS, 1994, 267: 513
- [16] Qiao G J, Zhang B. A&A, 1996, 306: L5
- [17] Björnsson C I. ApJ, 1996, 471: 321
- [18] Weatherall J C, Eilek J A. ApJ, 1997, 474: 407
- [19] Muslimov A G, Tsygan A I. MNRAS, 1992, 255: 61
- [20] Muslimov A G, Harding A K. ApJ, 1997, 485: 735
- [21] Harding A K, Muslimov A G. ApJ, 1998, 508: 328
- [22] Young M D, Manchester R N, Johnston S. Nature, 1999, 400: 848
- [23] Zhang B, Harding A K, Muslimov A G. ApJ, 2000, 531: L135
- [24] Arons J. ASPC, 2000, 202: 449
- [25] Gil J, Mitra D. ApJ, 2001, 550: 383
- [26] Hirschman J A, Arons J. ApJ, 2001, 560: 871
- [27] Nan R. ScChG, 2006, 49: 129
- [28] Peng B, Nan R, Su Y, et al. Ap&SS, 2001, 278: 219
- [29] Li D, Wang P, Qian L, et al. IMMAG, 2018, 19: 112
- [30] Tan C M, Bassa C G, Cooper S, et al. ApJ, 2018, 866: 54

Radiation Study on the Radio Pulsars with a Low Spin-down Energy Loss Rate

WU Qing-dong^{1,2} WANG De-hua^{1,2} ZHI Qi-jun^{1,2} YE Chang-qing^{1,2}
WANG Shuang-qiang³

(1 School of Physics and Electronic Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025)

(2 Key Laboratory of Radio Astronomy Data Processing in Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550025)

(3 Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

ABSTRACT The radiation theory of pulsar suggests that when the induced electric field and voltage caused by the rotated magnetic field of the neutron star decrease, which can not produce enough electron and positron pairs, the radio radiation of the pulsar will disappear, i.e., “die”. This paper analyzes the space distributions and the physical properties such as the spin periods of the 34 sources under the “death line”, i.e., the radio pulsars with a low spin-down energy loss rate. Firstly, these pulsars are all in the galactic field, which show no obvious correlation with the special types of pulsars and the pulsars with a high-energy radiation; Secondly, these pulsars locate in the low galactic latitude and near the solar system; Thirdly, these pulsars show the relative larger characteristic ages and larger spin periods; Last, the radio luminosity of 1400 MHz and the spin-down power \dot{E} of these pulsars show a weak correlation. We argue that the radio pulsars with a low spin-down power may loss energy due to radiation, causing the deceleration of the spin, whose \dot{E} decreases below the “death line”. We suggest that the survey for the radio pulsars with a low spin-down power should focus on the old and long spin period radio sources in the galactic field, and it is unnecessary to focus on the special type of the pulsars or the certain spatial positions. The Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) running at present in our country has the relatively higher sensitivity, which is supposed to observe more radio pulsars with a low spin-down power.

Key words pulsars: general, stars: neutron, radio radiation