

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2020.02.05

# 银河系球状星团射电脉冲星的统计研究

郑 娇, 游霄鹏

(西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

**摘要:** 球状星团是银河系中最古老的天体系统之一, 其恒星密度极端高的核心有利于创造双星之间进行物质交换的环境, 从而形成毫秒脉冲星双星、掩食脉冲双星、主序-毫秒脉冲双星、高轨道偏心率双星等双星系统, 通过对这些系统进行研究有助于进一步认识球状星团的动力学、双星系统的演化和星际介质等相关问题。自 30 年前在球状星团中发现第一颗射电脉冲星至今, 随着较高灵敏度射电望远镜的不断建成和使用, 以及数据数字化处理能力的提高, 天文学家在球状星团射电脉冲星的观测和理论研究方面取得很大进展。收集并分析了最新的球状星团脉冲星的数据, 研究了球状星团射电脉冲星的自转周期和轨道周期的基本性质, 讨论了球状星团脉冲星的搜寻, 最后统计分析了双星系统, 包括不同伴星类型的脉冲星的分布以及掩食双星系统的性质。

**关键词:** 球状星团; 射电脉冲星; 统计研究

**中图分类号:** P145.6

**文献标识码:** A

## 1 引 言

球状星团 (globular clusters, GCs) 是由大量低金属丰度的年老恒星组成的引力束缚系统。据统计, 银河系约有 500 多个球状星团, 至今已发现 157 个<sup>[1]</sup>。在球状星团中搜寻射电脉冲星需要大型射电望远镜的深度观测。1987 年 Lyne 等人在 M28 中发现第一颗球状星团脉冲星 PSR J1824-2452A 以后<sup>[2]</sup>, 在距离银河系中心 20 kpc 以内的 28 个星团中观测到 150 颗射电脉冲星<sup>[3]</sup>, 与其他脉冲星<sup>[4]</sup> 的性质有很多不同之处。球状星团射电脉冲星的研究对目前尚不清楚的球状星团的动力学、双星系统的演化、掩食双星系统的掩食机制和星际介质等相关问题具有很大价值。

脉冲星是大质量恒星 (质量范围为  $8 M_{\odot} \sim 25 M_{\odot}$ ) 演化末期发生超新星爆炸后的产物, 其在射电、光学、X 射线、 $\gamma$  射线等波段都有辐射, 目前主要探测到的是射电波段辐射毫秒至秒级的周期性脉冲信号的射电脉冲星, 主要分为普通脉冲星 (normal pulsars, NPs) 和毫

收稿日期: 2019-07-08; 修回日期: 2019-12-26

资助项目: 中央高校基本业务费 (XDJK2015B012)

通讯作者: 游霄鹏, yxp0910@swu.edu.cn

秒脉冲星 (millisecond pulsars, MSPs) 两类。通过对它们进行研究可以限制宿主星团的动力学状态、星团中子星的含量及探寻双星在星团动力学演化中的作用。毫秒脉冲星的自转周期短 (周期  $P$  的范围为  $1.4 \sim 30$  ms), 周期变化稳定 (典型的周期变化率  $\dot{P}$  为  $10^{-20}$ ), 表面磁场强度低 (典型的磁场强度  $B_s$  为  $10^4$  T), 年龄大 (典型的年龄  $\tau_c$  为  $10^9$  a)。在 1982 年, Backer 等人<sup>[5]</sup> 发现了第一颗毫秒脉冲星, 随后“再生”模型被广泛接受, 人们将毫秒脉冲星和小质量 X 射线双星联系起来<sup>[6]</sup>, 一般认为具有中子星成员的小质量 X 射线双星可能是毫秒脉冲星的前身星。由于毫秒脉冲星的起源与恒星相遇率有关, 在极端恒星密度的球状星团核心内 (球状星团的恒星核心密度比银道面高出 6 个数量级), 通过恒星间的交互作用产生了大量的吸积中子星系统, 处于系统中的年老中子星通过吸积伴星物质“再加速”形成毫秒脉冲星<sup>[6]</sup>。在球状星团中 90% 以上是毫秒脉冲星, 可能有数千个毫秒脉冲星的庞大族群, 因此球状星团成为搜寻毫秒脉冲星最受欢迎的场所。

我们总结了过去几年所取得的进展, 对球状星团中射电脉冲星开展了统计研究。第 2 章进行了观测样本的数据统计, 并简单分析了统计结果; 第 3 章简单阐述了银河系球状星团射电脉冲星的一些基本性质, 并与银盘脉冲星族群进行对比; 第 4 章讨论了球状星团脉冲星的搜寻; 第 5 章着重介绍了球状星团射电双星的伴星性质和一些有趣的掩食双星系统; 第 6 章给出结论并对今后射电脉冲星的搜寻和实际应用做出展望。

## 2 观测样本数据统计分析

### 2.1 搜寻现状

球状星团距离太阳相对较远, 目前 CATALOG OF PARAMETERS FOR MILKY WAY GLOBULAR CLUSTERS (2010 版)<sup>[1]</sup> 中的 157 个球状星团的距离范围为  $2.2 \sim 123.3$  kpc。自 1987 年以来, 通过洛弗尔射电望远镜 (Lovell)、帕克斯射电望远镜 (Parkes)、阿雷西博射电望远镜 (Arecibo)、巨米波射电望远镜 (Giant Metrewave Radio Telescope, GMRT) 和绿岸望远镜 (Green Bank Telescope, GBT) 等望远镜的搜寻, 在 20 kpc 以内的 28 个球状星团中观测到了 150 颗射电脉冲星, 现将 150 颗射电脉冲星样本的分类、观测所使用的望远镜、观测频率和参考文献的信息具体统计如表 1。

表 1 150 颗球状星团射电脉冲星的具体信息统计表

| 球状星团   | 脉冲星          | 类型  | 望远镜    | 频率/MHz | 参考文献 |
|--------|--------------|-----|--------|--------|------|
| 47 Tuc | J0024-7204aa | MSP | Parkes | 1 390  | [7]  |
|        | J0024-7204ab | MSP | Parkes | 1 390  | [7]  |
|        | J0024-7204C  | MSP | Parkes | 640    | [8]  |
|        | J0024-7204D  | MSP | Parkes | 640    | [9]  |
|        | J0024-7204E  | MSP | Parkes | 640    | [9]  |
|        | J0024-7204F  | MSP | Parkes | 640    | [9]  |
|        | J0024-7204G  | MSP | Parkes | 640    | [9]  |
|        | J0024-7204H  | MSP | Parkes | 640    | [9]  |

(续表)

| 球状星团     | 脉冲星         | 类型  | 望远镜     | 频率/MHz | 参考文献 |
|----------|-------------|-----|---------|--------|------|
|          | J0024-7204I | MSP | Parkes  | 640    | [9]  |
|          | J0024-7204J | MSP | Parkes  | 640    | [9]  |
|          | J0024-7204L | MSP | Parkes  | 640    | [9]  |
|          | J0024-7204M | MSP | Parkes  | 640    | [9]  |
|          | J0024-7204N | MSP | Parkes  | 436    | [10] |
|          | J0024-7204O | MSP | Parkes  | 1 374  | [11] |
|          | J0024-7204P | MSP | Parkes  | 1 374  | [11] |
|          | J0024-7204Q | MSP | Parkes  | 1 374  | [11] |
|          | J0024-7204R | MSP | Parkes  | 1 374  | [11] |
|          | J0024-7204S | MSP | Parkes  | 1 374  | [11] |
|          | J0024-7204T | MSP | Parkes  | 1 374  | [11] |
|          | J0024-7204U | MSP | Parkes  | 1 374  | [11] |
|          | J0024-7204V | MSP | Parkes  | 1 374  | [11] |
|          | J0024-7204W | MSP | Parkes  | 1 374  | [11] |
|          | J0024-7204X | MSP | Parkes  | 1 374  | [12] |
|          | J0024-7204Y | MSP | Parkes  | 1 374  | [13] |
|          | J0024-7204Z | MSP | Parkes  | 1 400  | [12] |
| NGC 1851 | J0514-4002A | MSP | GMRT    | 327    | [14] |
| M53      | J1312+1810  | NP  | Arecibo | 430    | [15] |
| M3       | J1342+2822A | MSP | Arecibo | 1 400  | [16] |
|          | J1342+2822B | MSP | Arecibo | 1 400  | [16] |
|          | J1342+2822C | MSP | GBT     | 1 400  | [16] |
|          | J1342+2822D | MSP | Arecibo | 1 400  | [16] |
| M5       | J1518+0204A | MSP | Arecibo | 430    | [17] |
|          | J1518+0204B | MSP | Arecibo | 430    | [17] |
|          | J1518+0204C | MSP | Arecibo | 1 400  | [16] |
|          | J1518+0204D | MSP | Arecibo | 327    | [18] |
|          | J1518+0204E | MSP | Arecibo | 1 400  | [16] |
| NGC 5986 | J1546-3747A | MSP | GBT     | 2 000  | [19] |
| M4       | J1623-2631  | MSP | Lovell  | 610    | [20] |
| M13      | J1641+3627A | MSP | Arecibo | 430    | [15] |
|          | J1641+3627B | MSP | Arecibo | 430    | [21] |
|          | J1641+3627C | MSP | Arecibo | 1 400  | [16] |
|          | J1641+3627D | MSP | Arecibo | 1 400  | [16] |
|          | J1641+3627E | MSP | Arecibo | 1 400  | [16] |
| M62      | J1701-3006A | MSP | Parkes  | 1 347  | [22] |
|          | J1701-3006B | MSP | Parkes  | 1 400  | [61] |
|          | J1701-3006C | MSP | Parkes  | 1 400  | [61] |
|          | J1701-3006D | MSP | GBT     | 1 400  | [24] |

(续表)

| 球状星团     | 脉冲星          | 类型  | 望远镜    | 频率/MHz | 参考文献 |
|----------|--------------|-----|--------|--------|------|
|          | J1701-3006E  | MSP | GBT    | 1 400  | [24] |
|          | J1701-3006F  | MSP | GBT    | 1 400  | [24] |
| NGC 6342 | J1721-1936   | NP  | Lovell | 610    | [25] |
| NGC 6397 | J1740-5340A  | MSP | Parkes | 1 374  | [22] |
| NGC 6440 | J1748-2021A  | NP  | Parkes | 640    | [26] |
|          | J1748-2021B  | MSP | GBT    | 1 950  | [27] |
|          | J1748-2021C  | MSP | GBT    | 1 950  | [27] |
|          | J1748-2021D  | MSP | GBT    | 1 950  | [27] |
|          | J1748-2021E  | MSP | GBT    | 1 950  | [27] |
|          | J1748-2021F  | MSP | GBT    | 1 950  | [27] |
| Ter 5    | J1748-2446A  | MSP | Parkes | 640    | [28] |
|          | J1748-2446aa | MSP | GBT    | *      | *    |
|          | J1748-2446ab | MSP | GBT    | *      | *    |
|          | J1748-2446ac | MSP | GBT    | *      | *    |
|          | J1748-2446ad | MSP | GBT    | 1 950  | [29] |
|          | J1748-2446ae | MSP | GBT    | *      | *    |
|          | J1748-2446af | MSP | GBT    | *      | *    |
|          | J1748-2446ag | MSP | GBT    | *      | *    |
|          | J1748-2446ah | MSP | GBT    | *      | *    |
|          | J1748-2446ai | MSP | GBT    | *      | *    |
|          | J1748-2446aj | MSP | GBT    | 1 400  | [30] |
|          | J1748-2446ak | MSP | GBT    | 1 400  | [30] |
|          | J1748-2446al | MSP | GBT    | 1 400  | [30] |
|          | J1748-2446am | MSP | GBT    | 2 000  | [31] |
|          | J1748-2446C  | MSP | Parkes | 1 392  | [32] |
|          | J1748-2446D  | MSP | Parkes | 1 400  | [33] |
|          | J1748-2446E  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446F  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446G  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446H  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446I  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446J  | NP  | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446K  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446L  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446M  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446N  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446O  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446P  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446Q  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446R  | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |

(续表)

| 球状星团     | 脉冲星         | 类型  | 望远镜    | 频率/MHz | 参考文献 |
|----------|-------------|-----|--------|--------|------|
|          | J1748-2446S | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446T | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446U | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446V | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446W | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446X | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446Y | MSP | GBT    | 1 950  | [34] |
|          | J1748-2446Z | MSP | GBT    | *      | *    |
| NGC 6441 | J1750-3703A | NP  | Parkes | 1 400  | [35] |
|          | J1750-3703B | MSP | GBT    | 1 950  | [27] |
|          | J1750-3703C | MSP | GBT    | 1 950  | [27] |
|          | J1750-3703D | MSP | GBT    | 1 950  | [27] |
| NGC 6517 | J1801-0857A | MSP | GBT    | 2 000  | [36] |
|          | J1801-0857B | MSP | GBT    | 2 000  | [36] |
|          | J1801-0857C | MSP | GBT    | 2 000  | [36] |
|          | J1801-0857D | MSP | GBT    | 2 000  | [36] |
| NGC 6522 | J1803-3002A | MSP | Parkes | 1 400  | [35] |
|          | J1803-3002B | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |
|          | J1803-3002C | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |
| NGC 6539 | J1804-0735  | MSP | Parkes | 1 520  | [38] |
| NGC 6544 | J1807-2459A | MSP | Parkes | 1 374  | [22] |
|          | J1807-2459B | MSP | GBT    | 1 400  | [24] |
| NGC 6624 | J1823-3021A | MSP | Lovell | 610    | [39] |
|          | J1823-3021B | NP  | Lovell | 610    | [39] |
|          | J1823-3021C | NP  | GBT    | 1 400  | [24] |
|          | J1823-3021D | MSP | GBT    | 1 400  | [40] |
|          | J1823-3021E | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |
|          | J1823-3021F | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |
| M28      | J1824-2452A | MSP | Lovell | 327    | [2]  |
|          | J1824-2452B | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |
|          | J1824-2452C | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |
|          | J1824-2452D | NP  | GBT    | 1 400  | [37] |
|          | J1824-2452E | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |
|          | J1824-2452F | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |
|          | J1824-2452G | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |
|          | J1824-2452H | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |
|          | J1824-2452I | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |
|          | J1824-2452J | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |
|          | J1824-2452K | MSP | GBT    | 1 400  | [37] |

| (续表)     |             |     |         |        |      |
|----------|-------------|-----|---------|--------|------|
| 球状星团     | 脉冲星         | 类型  | 望远镜     | 频率/MHz | 参考文献 |
|          | J1824-2452L | MSP | GBT     | 1 400  | [37] |
| NGC 6652 | J1835-3259A | MSP | GBT     | 2 000  | [41] |
| M22      | J1836-2354A | MSP | GBT     | 2 000  | [36] |
|          | J1836-2354B | MSP | GBT     | 2 000  | [36] |
| NGC 6749 | J1905+0154A | MSP | Arecibo | 1 400  | [16] |
|          | J1905+0154B | MSP | Arecibo | 1 400  | [16] |
| NGC 6752 | J1910-5959A | MSP | Parkes  | 1 374  | [22] |
|          | J1910-5959B | MSP | Parkes  | 1 400  | [42] |
|          | J1910-5959C | MSP | Parkes  | 1 400  | [42] |
|          | J1910-5959D | MSP | Parkes  | 1 400  | [42] |
|          | J1910-5959E | MSP | Parkes  | 1 400  | [42] |
| NGC 6760 | J1911+0101A | MSP | Arecibo | 1 415  | [21] |
|          | J1911+0101B | MSP | Arecibo | 1 410  | [43] |
| M71      | J1953+1846A | MSP | Arecibo | 1 400  | [16] |
| M15      | J2129+1210A | NP  | Arecibo | 1 415  | [44] |
|          | J2129+1210B | NP  | Arecibo | 430    | [45] |
|          | J2129+1210C | MSP | Arecibo | 430    | [45] |
|          | J2129+1210D | MSP | Arecibo | 430    | [46] |
|          | J2129+1210E | MSP | Arecibo | 430    | [46] |
|          | J2129+1210F | MSP | Arecibo | 430    | [21] |
|          | J2129+1210G | NP  | Arecibo | 430    | [21] |
|          | J2129+1210H | MSP | Arecibo | 430    | [21] |
| M30      | J2140-2310A | MSP | GBT     | 1 375  | [47] |
|          | J2140-2310B | MSP | GBT     | 1 375  | [47] |

注：“\*”代表已编入星表中但暂未发表的球状星团 Ter 5 中的 9 颗射电脉冲星。

根据表 1, 现将各大射电望远镜的建成时间、口径、观测频率和搜寻的球状星团脉冲星数目的信息总结如表 2 所示。美国国家射电天文台 (National Radio Astronomy Observatory, NRAO) 口径为 100 m 的 GBT 对球状星团进行高频观测 (主要频率为 1 375 MHz, 1 400 MHz, 1 950 MHz, 2 000 MHz) 发现的射电脉冲星数目最多 (共 75 颗), 占有星团脉冲星数目的 50%; 其次是澳大利亚国家射电天文台帕克斯天文观测站 (CSIRO Parkes Observatory) 口径为 64 m 的 Parkes, 在低频 (436 MHz, 640 MHz) 和 高频 (1 374 MHz, 1 400 MHz) 发现了 42 颗射电脉冲星; 美国阿雷西博天文台 (Arecibo Observatory) 口径为 305 m 的 Arecibo 在低频 (327 MHz, 430 MHz) 和 高频 (1 400 MHz) 共观测到 27 颗射电脉冲星; 英国曼彻斯特大学乔德雷尔班克天文台 (Jodrell Bank Observatory) 口径为 76 m 的 Lovell 和印度的 GMRT, 在低频段共发现 6 颗射电脉冲星。

表 2 探测球状星团射电脉冲星的主要射电望远镜信息统计表

| 望远镜     | 建成年份 | 口径/m | 观测频率/MHz                | 脉冲星数量 |
|---------|------|------|-------------------------|-------|
| GBT     | 2000 | 100  | 1 375/1 400/1 950/2 000 | 75    |
| Parkes  | 1961 | 64   | 436/640/1 374/1 400     | 42    |
| Arecibo | 1963 | 305  | 327/430/1 400           | 27    |
| Lovell  | 1958 | 76   | 327/610                 | 5     |
| GMRT    | 1994 | Y字天线 | 327                     | 1     |

图 1 展示了脉冲星的数目随发表时间的变化情况, 可以看出, 从第一颗球状星团中射电脉冲星发表至 2000 年仅发表了 43 颗 (其中 70% 是低频观测的样本); 在 2001 年至 2011 年期间, 发表的脉冲星数目快速增多, 样本总数达到 142 颗 (主要是高频观测)。这 10 年间球状星团射电脉冲星观测进展较快, 主要是由于 2000 年初 GBT 的建成和使用, 它的主要科学任务之一就是搜寻脉冲星, 并且 3 年后天文学家将球状星团脉冲星的搜寻列进 GBT 的巡天项目, 大大增加了球状星团中已知的观测样本<sup>[48]</sup>。GBT 仅在 Ter 5 中就发现了 35 颗新的毫秒脉冲星, 因此 Ter 5 成为发现毫秒脉冲星最多的球状星团。位于低射频干扰环境的 GBT 具有低噪声接收机, 较大观测天区 ( $\geq 85\%$  的天球), 0.1 ~ 116 GHz 的工作频率, 在高频观测时灵敏度更高等优势, 其对球状星团射电脉冲星的观测做出的贡献最大。2011 年以后, 仅发表了 8 颗脉冲星, 从而显示出当前一代射电望远镜在灵敏度等性能上的限制。但总体来说, 这些脉冲星的搜寻非常成功, 这些观测结果既表示球状星团中还有很多脉冲星等待人们去搜寻, 又意味着射电天文工作者一直在不断努力寻找才保持了数量的上升率。

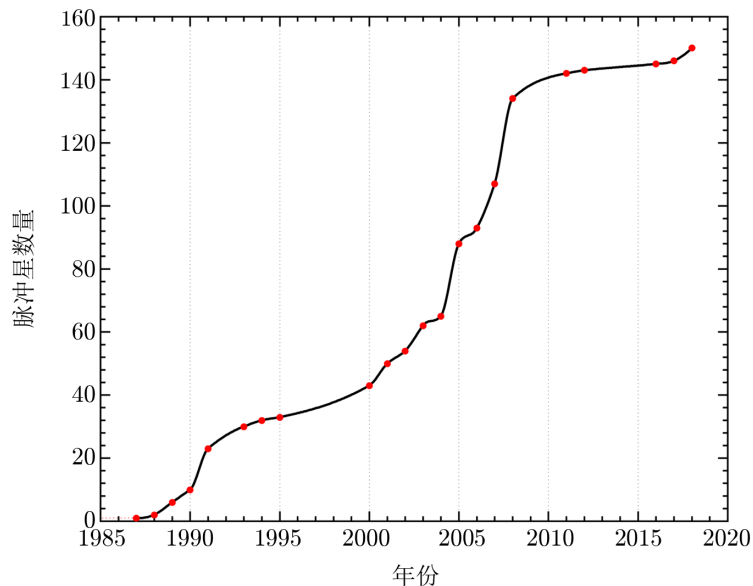


图 1 球状星团射电脉冲星的观测数量随发表时间的折线图

图 2 为每个球状星团所包含脉冲星的数量和类型的直方图。球状星团 Ter 5, 47 Tuc 和 M28 中发现的脉冲星样本较多, 它们分别包含 38 颗、25 颗和 12 颗脉冲星, 约占所有观测样本的 50%。在 28 个星团中观测到的普通脉冲星不到总样本的 10%, 其中 M3 中的 PSR J1342+2822C (M3 C) 和 NGC 6749 中的 PSR J1905+0154B (NGC 6749B) 还需要进一步观测确认。

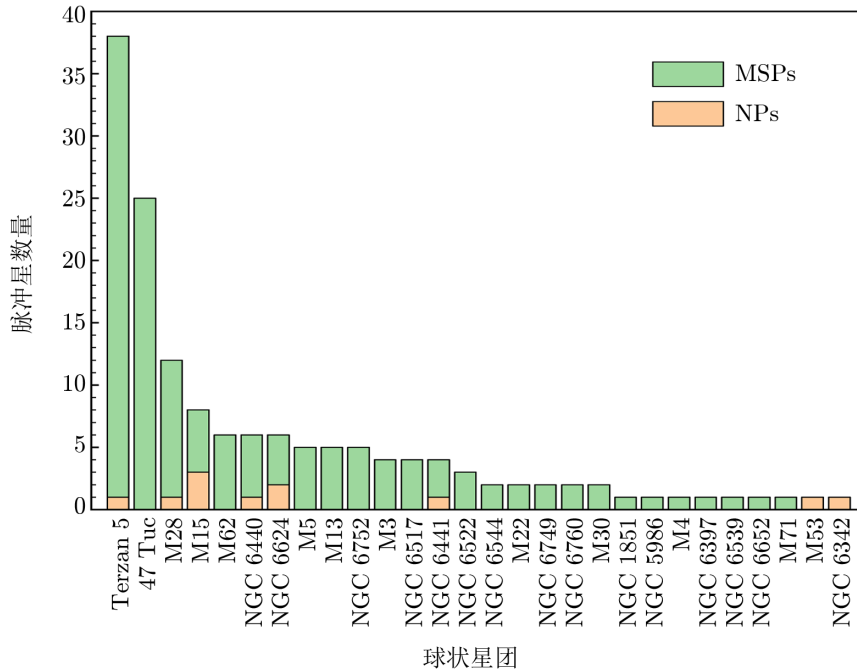


图 2 28 个球状星团所包含的脉冲星的数量和类型的直方图

## 2.2 整体占比分析

50 多年以来在银河系内和银河系外共发现近 3 000 颗脉冲星<sup>[4]</sup>, 从观测的角度来衡量, 平均每年发现约 60 颗。表 3 是所有已知脉冲星样本的分布统计表, 根据本文样本分析需要, 将所有观测到的脉冲星分为球状星团脉冲星和非球状星团脉冲星。对已知脉冲星样本分布进行分析论述, 得出以下 3 点结论: 1) 从整体观测样本来看, 球状星团脉冲星约占已知样本总数的 5.60%, 且球状星团中毫秒脉冲星的占比 (> 90.00%) 与非球状星团的毫秒脉冲星占比 (< 10.00%) 形成鲜明对比。其主要原因一方面可能是原始双星的演化形成毫秒脉冲星; 另一方面是在球状星团核心的超密恒星环境中, 恒星间的交互作用有利于形成“再生”中子星双星系统<sup>[49]</sup>。2) 球状星团中的双星系统占比 (54.00%) 约是非球状星团中双星系统占比 (8.54%) 的 6 倍。3) 毫秒脉冲星通常认为是由双星系统吸积加速再生而来, 但观测发现在球状星团和非球状星团中孤立毫秒脉冲星并不少见。统计发现, 球状星团中的孤立毫秒脉冲星占比 (约 45.65%) 远远大于非球状星团中的毫秒脉冲星占比 (约 27.87%)。天文学家对它们的起源进行了多方面的研究, 但目前对此并没有统一的解释。其可能的主要形成机制如



下: 由恒星之间相互碰撞导致毫秒脉冲星失去伴星而形成 (碰撞机制)<sup>[48]</sup>; 由中子星与大质量白矮星并合而形成<sup>[50]</sup>; 由伴星被中子星风蒸发而形成 (蒸发机制)<sup>[51, 52]</sup>; 由大质量伴星发生超新星爆发破坏已产生毫秒脉冲星的双星系统而形成<sup>[53, 54]</sup>; 由三体系统动力学相互作用而形成<sup>[55, 56]</sup>。在球状星团中, 由于其极端的恒星密度 (尤其是恒星密度更大的核心区域), 蒸发机制和碰撞机制可以更好地解释孤立毫秒脉冲星的存在<sup>[48]</sup>。

表 3 已知射电脉冲星样本分布统计表

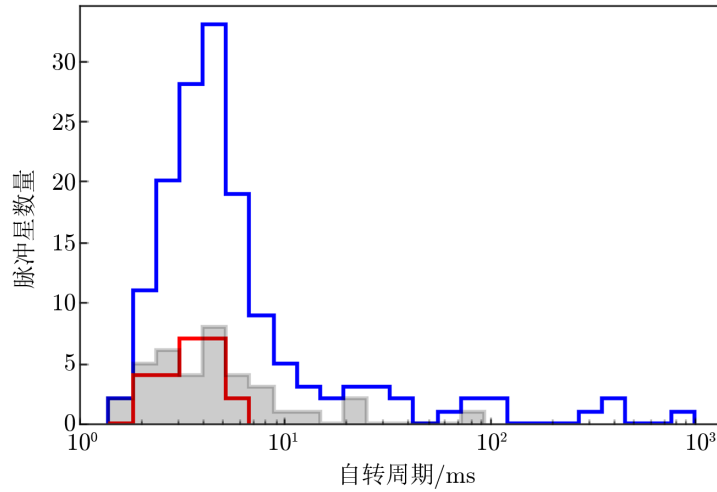
|       | 脉冲星总数<br>( $N_T$ ) | 毫秒脉冲星<br>( $N_M$ ) | 双星<br>( $N_B$ ) | 孤立毫秒脉冲星<br>( $N_I$ ) | $N_M/N_T$ | $N_B/N_T$ | $N_I/N_M$ |
|-------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 球状星团  | 150                | 138                | 81              | 63                   | 92.00%    | 54.00%    | 45.65%    |
| 非球状星团 | 2 554              | 244                | 218             | 68                   | 9.55%     | 8.54%     | 27.87%    |
| 总量    | 2 704              | 382                | 299             | 131                  | 14.13%    | 11.06%    | 34.29%    |

### 3 球状星团射电脉冲星的基本性质

#### 3.1 自转周期分布

目前已知的脉冲星的自转周期范围为 1.4 ms ~ 23.5 s, 现将 2005 年 Camilo 和 Rasio<sup>[57]</sup> 对 100 颗球状星团脉冲星的自转周期分布的工作进行更新, 图 3 是 150 颗球状星团射电脉冲星的自转周期分布直方图, 其中 90% 以上是周期小于 30 ms 的毫秒脉冲星。位于 47 Tuc 中的 25 颗脉冲星都是毫秒脉冲星, 且周期分布范围较窄 (见图中红色实线部分); 与 47 Tuc 相比较, Ter 5 中的脉冲星周期分布范围较广 (见图中灰色阴影部分), 其中最引人注意的 PSR J1748-2446ad (Ter 5 ad) 是目前发现的自转最快的天体, 自转频率为 716 MHz<sup>[29]</sup>。球状星团双星系统中毫秒脉冲星的平均周期 (5.35 ms) 略小于星团中孤立毫秒脉冲星的平均周期 (5.63 ms), 但 T 检验的结果表明两个样本的平均周期并无较大统计差异。

人们普遍认为脉冲星是快速旋转的中子星, 它们大多数在旋转过程中伴随着转动能的消耗, 导致其自转频率不断减慢, 因此观测到的周期变化率  $\dot{P}$  为正值, 但也存在  $\dot{P}$  为负值的情况。球状星团和非球状星团中  $\dot{P}$  为负值的样本统计见表 4, 在非球状星团中仅观测到 5 个  $\dot{P}$  为负值的脉冲星, 1 个为毫秒脉冲星, 另外 4 个都为普通脉冲星。在球状星团中 37 个  $\dot{P}$  为负值的系统中, 除 M15 中 PSR J2129+1210A (M15 A) 这颗自转较慢的普通脉冲星 ( $P$  为 110.66 ms) 外, 其余全是毫秒脉冲星。脉冲星这种与自转减速相悖的自旋加速现象, 并不是其固有性质, 最合理的解释为脉冲星位于球状星团较远的那一端, 正在向地球加速 (即当脉冲星在星团的引力势范围内运动时的视线加速度指向观测者), 并且克服了由于固有的自旋减慢的正  $\dot{P}$ <sup>[24]</sup>。在球状星团中发现  $\dot{P}$  为负值样本最多的是 47 Tuc, 占该星团脉冲星数目的 50% 以上。



注：蓝色实线直方图表示 150 颗球状星团脉冲星的自转周期分布，灰色阴影直方图表示 Ter 5 中 38 颗脉冲星的自转周期分布，红色实线直方图表示 47 Tuc 中 25 颗脉冲星的自转周期分布。

图 3 已知 150 颗球状星团射电脉冲星的自转周期分布直方图

表 4 周期变化率  $\dot{P}$  为负值的射电脉冲星统计表

| 球状星团   | 脉冲星          | 自转周期/ms | 周期变化率/ $10^{-20}$ | 类型 |
|--------|--------------|---------|-------------------|----|
| 47 Tuc | J0024-7204C  | 5.76    | -4.985            | 单星 |
|        | J0024-7204D  | 5.36    | -0.343            | 单星 |
|        | J0024-7204G  | 4.04    | -4.215            | 单星 |
|        | J0024-7204H  | 3.21    | -0.183            | 双星 |
|        | J0024-7204I  | 3.48    | -4.587            | 单星 |
|        | J0024-7204J  | 2.10    | -0.979            | 双星 |
|        | J0024-7204L  | 4.35    | -12.206           | 单星 |
|        | J0024-7204M  | 3.68    | -3.844            | 单星 |
|        | J0024-7204N  | 3.05    | -2.187            | 单星 |
|        | J0024-7204S  | 2.83    | -12.054           | 双星 |
|        | J0024-7204W  | 2.35    | -8.655            | 双星 |
|        | J0024-7204Y  | 2.20    | -3.517            | 双星 |
|        | J0024-7204Z  | 4.55    | -0.456            | 单星 |
|        | J0024-7204aa | 1.85    | -4.589            | 单星 |
| M5     | J1518+0204B  | 7.95    | -0.331            | 双星 |
| M4     | J1623-2631   | 11.08   | -5.469            | 三星 |
| M62    | J1701-3006A  | 5.24    | -13.196           | 双星 |
|        | J1701-3006B  | 3.59    | -34.978           | 双星 |
|        | J1701-3006C  | 7.61    | -6.378            | 双星 |
| Ter 5  | J1748-2446A  | 11.56   | -3.400            | 双星 |
|        | J1748-2446C  | 8.44    | -60.600           | 单星 |

(续表)

| 球状星团     | 脉冲星          | 自转周期/ms | 周期变化率/ $10^{-20}$ | 类型 |
|----------|--------------|---------|-------------------|----|
|          | J1748-2446am | 2.93    | -13.680           | 双星 |
| NGC 6440 | J1748-2021B  | 16.76   | -32.913           | 双星 |
|          | J1748-2021C  | 6.23    | -5.984            | 单星 |
|          | J1748-2021F  | 3.79    | -1.055            | 双星 |
| NGC 6441 | J1750-3703C  | 26.57   | -99.600           | 单星 |
| NGC 6517 | J1801-0857A  | 7.18    | -51.310           | 单星 |
|          | J1801-0857C  | 3.74    | -6.500            | 单星 |
| NGC 6544 | J1807-2459A  | 3.06    | -0.434            | 单星 |
| M22      | J1836-2354B  | 3.23    | -0.048            | 单星 |
| NGC 6752 | J1910-5959B  | 8.36    | -79.041           | 单星 |
|          | J1910-5959E  | 4.57    | -43.435           | 单星 |
| NGC 6760 | J1911+0102A  | 3.62    | -0.658            | 单星 |
|          | J1911+0101B  | 5.38    | -0.200            | 单星 |
| M15      | J2129+1210A  | 110.66  | -2 107.810        | 单星 |
|          | J2129+1210D  | 4.80    | -107.500          | 单星 |
| M30      | J2140-2310A  | 11.02   | -5.181            | 双星 |
| Non-GC   | J1144-6146   | 987.78  | -3 800.000        | 单星 |
|          | J1801-3210   | 7.45    | -0.004            | 双星 |
|          | J1817-0743   | 438.10  | -230.000          | 单星 |
|          | J1829-1011   | 829.17  | -500.000          | 单星 |

注: Non-GC 代表非球状星团。

### 3.2 轨道周期分布

自 1987 年 Lyne 等人<sup>[20]</sup> 使用 Lovell 射电望远镜在球状星团 M4 中发现第一个双星系统至今, 在 28 个星团中共发现了 81 个脉冲双星系统, 比 Camilo 和 Rasio<sup>[57]</sup> 在 2005 年的工作增加了 30 多个样本。目前所有球状星团射电脉冲双星系统的轨道周期分布如图 4 所示, 这些双星系统中 50% 的轨道周期  $P_b$  小于 24 h, 属于短周期双星系统, 其他系统的轨道周期  $P_b$  主要分布在 1 ~ 10 d 的范围。另外有 3 个比较独特的轨道周期  $P_b$  超过 100 d 的较长周期双星系统, 它们分别是位于 M3 中的 PSR J1342+2822D (M3 D)( $P_b$  为 128.75 d)<sup>[16]</sup>, M4 中的三重系统 PSR J1623-2631 ( $P_b$  为 191.44 d)<sup>[20]</sup>, 以及 M53 中的 PSR J1312+1810 ( $P_b$  为 255.8 d)<sup>[15]</sup>。已知轨道周期最短的毫秒脉冲星双星系统是 47 Tuc 中的 PSR J0024-7204R (47 Tuc R)<sup>[11]</sup>, 其轨道周期  $P_b$  为 1.59 h。球状星团 M3 中的 PSR J1342+2822A (M3 A), M3 C, NGC 6624 中的 PSR J1823-3021F (NGC 6624F) 以及 NGC 6749B 这 4 个双星的轨道周期还有待确定。

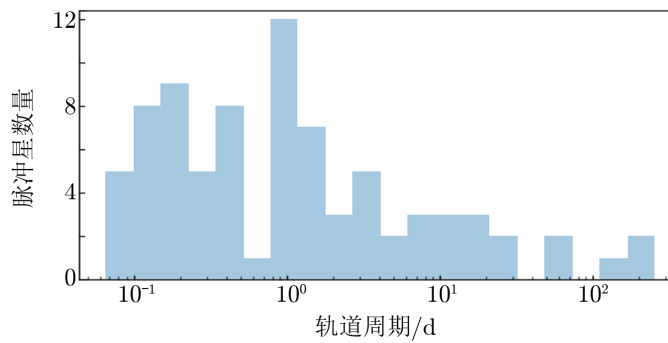


图4 81个球状星团射电脉冲双星的轨道周期分布

#### 4 球状星团射电脉冲星的搜寻

球状星团射电脉冲星的发现是脉冲星研究史上的一个里程碑(尤其是已知旋转速度最快的毫秒脉冲星 Ter 5 ad 的发现),但由于众多因素的影响,星团脉冲星的搜寻面临更多挑战。2007年, Ransom<sup>[58]</sup>对星团的距离、双星的搜寻、望远镜的灵敏度、观测频率等影响星团脉冲星搜寻的因素做了详细分析后指出,主要是由于球状星团射电脉冲星距离较远且大多处于短周期双星系统中,因而受到观测选择效应的影响较难被发现。现根据银河系157个星团的银经和银纬画出了它们在银道坐标系中的空间分布<sup>[1]</sup>,如图5所示,图中红色星号表示已观测到脉冲星的28个球状星团(红色星号的面积大小由所包含的已发现射电脉冲星的数目决定),蓝色圆点表示129个未探测到脉冲星的球状星团。通过统计得出,未观测到脉冲星的129个球状星团和已观测到脉冲星的28个球状星团中约80%分布在银纬 $\pm 30^\circ$ 的区域。对于还未观测到脉冲星的星团的搜寻,正是高灵敏度的500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope, FAST)以及将来建成的平方千米射电阵(Square Kilometre Array, SKA)的努力方向。

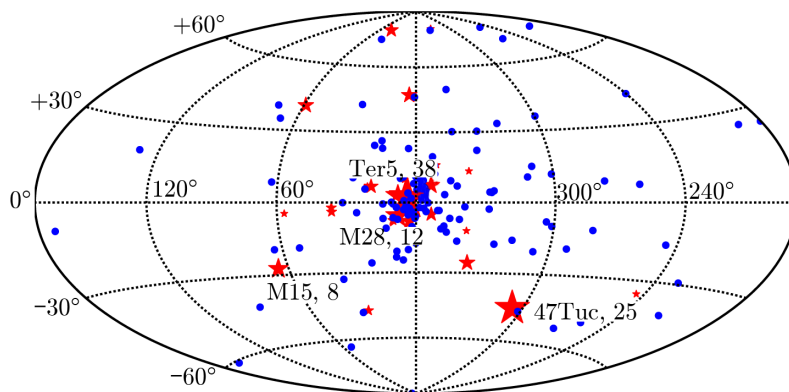


图5 157个球状星团在银道坐标系中的空间分布图

## 5 球状星团射电脉冲双星系统

### 5.1 射电脉冲星的伴星

球状星团特殊的环境导致产生大量的双星系统, 为测量中子星的质量和 研究各种恒星相互作用提供了丰富的信息。目前在非球状星团脉冲星中有 197 个双星系统的伴星类型已确定 (其中 17 个双星系统的伴星类型需进一步明确)<sup>[4]</sup>, 在球状星团中有 52 个此类系统 (其中 4 个双星系统的伴星类型需进一步明确)<sup>[3]</sup>。脉冲双星的伴星有白矮星、主序星和中子星等类型。表 5 给出球状星团脉冲双星的伴星的自转周期、轨道周期、轨道偏心率、伴星质量以及伴星类型信息, 表的第 7 列表示双星伴星类型, He, UL, MS, NS 和 CO 分别代表 He 白矮星、超轻伴星或行星、主序星、中子星、CO 或 ONeMg 白矮星。通过表 5 和图 6 可以得出, 约 50% 的双星系统是中子星-白矮星双星系统 (伴星质量  $M_c$  范围为  $0.038 M_\odot \sim 0.34 M_\odot$ ); 其次占比较大的是中子星和 UL 伴星系统 ( $M_c$  范围为  $0.01 M_\odot \sim 0.1 M_\odot$ ), 这类系统几乎处于圆形轨道上。在一般情况下, 这些脉冲双星系统的伴星质量都是基于测量质量函数得到; 少数情况下是直接探测得到的, 例如通过测量光辐射<sup>[57]</sup>。

在球状星团 M15 中存在一个双中子星系统 PSR J2129+1210C (M15 C), 其伴星质量  $M_c$  为  $1.13 M_\odot$ , 在周期为 8 h 的偏心率较大的轨道上运行, 可能是在一个三体交互作用中形成<sup>[46]</sup>。球状星团 NGC 6544 中的 PSR J1807-2500B (NGC 6544B), 其相应的伴星质量  $M_c$  为  $1.47 M_\odot$ , 可能是高偏心率的毫秒脉冲星-中子星系统。在球状星团 M4 中, PSR J1623-2631 和白矮星、大质量行星组成三星系统, 这是迄今为止在球状星团中观测到的唯一三星系统。在 47 Tuc 中, 40% 的毫秒脉冲星拥有质量  $M_c \ll 0.03 M_\odot$  的伴星, 另外 60% 拥有  $M_c \approx 0.2 M_\odot$  的伴星, 其中 PSR J0024-7204W (47 Tuc W) 处于毫秒脉冲星-主序星双星系统, 在所有星团中共发现 3 个这类独特的系统。对于 NGC 6749 中的 PSR J1905+0154A (NGC 6749A), Ter 5 中的 PSR J1748-2446I (Ter 5 I) 以及 M5 中的 PSR J1518+0204C (M5 C), 人们对它们的伴星知之甚少, 目前暂不能完全确定其伴星类型。

通过将图 6 a) 和 b) 的脉冲星类型分布图进行对比, 我们发现球状星团和非球状星团脉冲星的伴星都主要是 He 白矮星, 前者明显比后者包含较多 UL 白矮星伴星, 但缺乏 CO 白矮星伴星。除此之外, 极少数脉冲星有 NS 伴星和 MS 伴星。

### 5.2 掩食射电脉冲双星系统

演化模型表明, 掩食双星系统只可能在恒星相互作用率较高的环境中形成, 银河系球状星团提供了最有可能找到此类系统的环境<sup>[43]</sup>。自 1990 年 Lyne 等人<sup>[28]</sup> 在 Ter 5 中发现第一个掩食双星系统至今, 已在 11 个球状星团中共发现了 20 个此类系统, 其自转周期、轨道周期、轨道偏心率、伴星质量、伴星类型、掩食时长占比 (占轨道周期的百分比)、观测频率、掩食系统类型等统计信息见表 5。除了远离球状星团 NGC 6342 中心的 PSR J1721-1936 ( $P$  为 1 004.04 ms) 是观测到的唯一一颗掩食的普通脉冲星, 其他都是毫秒脉冲星, 并且这些系统具有极小轨道偏心率甚至偏心率为零, 且主要是在高频段观测到的。在富含脉冲星的两个球状星团 47 Tuc 和 Ter 5 中发现的掩食毫秒脉冲双星最多。

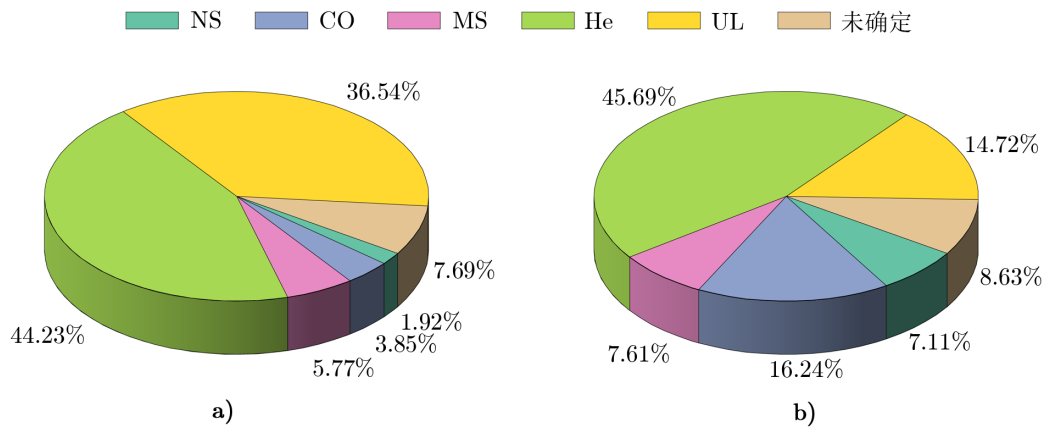


图 6 a) 球状星团脉冲星伴星类型分布图; b) 非球状星团脉冲星伴星类型分布图

表 5 球状星团双星系统信息统计表

| 球状星团   | 脉冲星         | 自转周期 /ms | 轨道周期 /d | 轨道偏心率  | 伴星质量 / $M_{\odot}$ | 伴星类型  | 掩食时长占比 | 观测频率 /MHz | 系统类型    |    |
|--------|-------------|----------|---------|--------|--------------------|-------|--------|-----------|---------|----|
| 47 Tuc | J0024-7204H | 3.21     | 2.36    | 0.070  | 56                 | 0.19  | He     | -         | -       | -  |
|        | J0024-7204I | 3.48     | 0.23    | <0.000 | 4                  | 0.015 | UL     | -         | -       | -  |
|        | J0024-7204J | 2.10     | 0.12    | <0.000 | 04                 | 0.024 | UL     | 25%       | 436/640 | BW |
|        | J0024-7204O | 2.64     | 0.14    | <0.000 | 16                 | 0.025 | UL     | 10%~15%   | 1 374   | BW |
|        | J0024-7204P | 3.64     | 0.15    | 0.0    | 0.02               | 0.02  | UL     | -         | -       | -  |
|        | J0024-7204Q | 4.03     | 1.19    | 0.000  | 085                | 0.21  | He     | -         | -       | -  |
|        | J0024-7204R | 3.48     | 0.07    | 0.0    | 0.03               | 0.03  | UL     | 25%       | 1 374   | BW |
|        | J0024-7204S | 2.83     | 1.20    | 0.000  | 398                | 0.1   | He     | -         | -       | -  |
|        | J0024-7204T | 7.59     | 1.13    | 0.000  | 4                  | 0.2   | He     | -         | -       | -  |
|        | J0024-7204U | 4.34     | 0.43    | 0.000  | 149                | 0.14  | He     | -         | -       | -  |
|        | J0024-7204V | 4.81     | 0.21    | 0.0    | 0.35               | 0.35  | *      | 50%       | 1 390   | RB |
|        | J0024-7204W | 2.35     | 0.13    | 0.0    | 0.14               | 0.14  | MS     | 25%       | 1 374   | RB |
|        | J0024-7204Y | 2.20     | 0.52    | 0.000  | 003                | 0.16  | He     | -         | -       | -  |
| M3     | J1342+2822B | 2.39     | 1.42    | 0.0    | 0.21               | 0.21  | He     | -         | -       | -  |
|        | J1342+2822D | 5.44     | 128.75  | 0.075  | 3                  | 0.21  | He     | -         | -       | -  |
| M5     | J1518+0204B | 7.95     | 6.86    | 0.137  | 84                 | 0.13  | He     | -         | -       | -  |
|        | J1518+0204C | 2.48     | 0.09    | 0.0    | 0.038              | 0.038 | He(?)  | 15%       | 430     | BW |
|        | J1518+0204D | 2.99     | 1.22    | 0.0    | 0.2                | 0.2   | He     | -         | -       | -  |
|        | J1518+0204E | 3.18     | 1.10    | 0.0    | 0.15               | 0.15  | He     | -         | -       | -  |
| M4     | J1623-2631  | 11.08    | 191.44  | 0.025  | 315                | 0.33  | HeT    | -         | -       | -  |
| M13    | J1641+3627B | 3.53     | 1.26    | <0.001 | 0.19               | 0.19  | He     | -         | -       | -  |
|        | J1641+3627E | 2.49     | 0.12    | 0.0    | 0.02               | 0.02  | UL     | -         | -       | -  |

(续表)

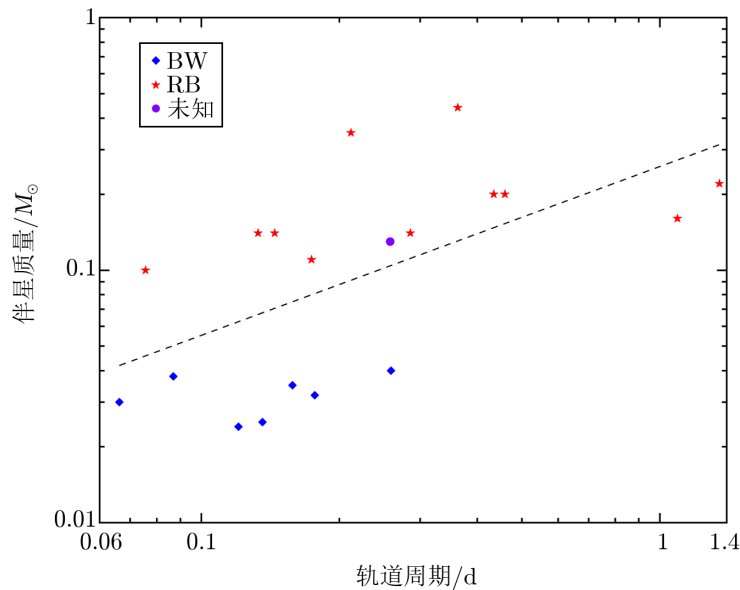
| 球状星团        | 脉冲星          | 自转<br>周期<br>/ms | 轨道<br>周期<br>/d | 轨道偏心率     | 伴星<br>质量<br>/ $M_{\odot}$ | 伴星<br>类型 | 掩食<br>时长<br>占比 | 观测<br>频率<br>/MHz            | 系统<br>类型 |
|-------------|--------------|-----------------|----------------|-----------|---------------------------|----------|----------------|-----------------------------|----------|
| M62         | J1701-3006A  | 5.24            | 3.81           | 0.000 004 | 0.23                      | He       | —              | —                           | —        |
|             | J1701-3006B  | 3.59            | 0.14           | <0.000 07 | 0.14                      | He       | 20%            | 1 400                       | RB       |
|             | J1701-3006C  | 7.61            | 0.22           | <0.000 06 | 0.08                      | UL       | —              | —                           | —        |
|             | J1701-3006D  | 3.42            | 1.12           | 0.000 45  | 0.14                      | He       | —              | —                           | —        |
|             | J1701-3006E  | 3.23            | 0.16           | 0.0       | 0.035                     | UL       | 15%            | 1 400                       | BW       |
|             | J1701-3006F  | 2.29            | 0.21           | 0.0       | 0.024                     | UL       | —              | —                           | —        |
| NGC 6342    | J1721-1936   | 1 004.04        | 0.26           | <0.005    | 0.13                      | *        | *              | 408/606/<br>1 404/<br>1 660 | *        |
| NGC 6397    | J1740-5340A  | 3.65            | 1.35           | <0.000 1  | 0.22                      | MS       | >40%           | 1 400                       | RB       |
| Ter 5       | J1748-2446A  | 11.56           | 0.08           | 0.0       | 0.1                       | UL       | 10%            | 728/1 368<br>/3 100         | RB       |
|             | J1748-2446ad | 1.40            | 1.09           | 0.0       | 0.16                      | *        | 40%            | 2 000                       | RB       |
|             | J1748-2446ae | 3.66            | 0.17           | 0.0       | 0.019                     | UL       | —              | —                           | —        |
|             | J1748-2446E  | 2.20            | 60.06          | 0.02      | 0.25                      | He       | —              | —                           | —        |
|             | J1748-2446I  | 9.57            | 1.33           | 0.428     | 0.24                      | He(?)    | —              | —                           | —        |
|             | J1748-2446J  | 80.34           | 1.10           | 0.35      | 0.39                      | CO       | —              | —                           | —        |
|             | J1748-2446M  | 3.57            | 0.44           | 0.0       | 0.16                      | He       | —              | —                           | —        |
|             | J1748-2446N  | 8.67            | 0.39           | 0.000 045 | 0.56                      | CO       | —              | —                           | —        |
|             | J1748-2446O  | 1.68            | 0.26           | 0.0       | 0.04                      | UL       | 5%             | 1 950                       | BW       |
|             | J1748-2446P  | 1.73            | 0.36           | 0.0       | 0.44                      | MS       | 50%            | 1 950                       | RB       |
|             | J1748-2446V  | 2.07            | 0.50           | 0.0       | 0.14                      | He       | —              | —                           | —        |
| J1748-2446W | 4.21         | 4.88            | 0.015          | 0.34      | He                        | —        | —              | —                           |          |
| J1748-2446Y | 2.05         | 1.16            | 0.000 02       | 0.16      | He                        | —        | —              | —                           |          |
| NGC 6440    | J1748-2021D  | 13.50           | 0.29           | 0.0       | 0.14                      | *        | 10%            | 1 950                       | RB       |
| NGC 6544    | J1807-2459A  | 3.06            | 0.07           | 0.0       | 0.01                      | UL       | —              | —                           | —        |
|             | J1807-2459B  | 4.19            | 9.96           | 0.747 033 | 1.47                      | CO(?)    | —              | —                           | —        |
| NGC 6624    | J1823-3021F  | 4.85            | *              | *         | *                         | *        | *              | *                           | RB       |
| M28         | J1824-2452G  | 5.91            | 0.10           | 0.0       | 0.011                     | UL       | —              | —                           | —        |
|             | J1824-2452H  | 4.63            | 0.44           | 0.0       | 0.2                       | *        | 20%            | 1 400                       | RB       |
|             | J1824-2452I  | 3.93            | 0.46           | 0.0       | 0.2                       | He       | 25%            | 1 400                       | RB       |
|             | J1824-2452J  | 4.04            | 0.10           | 0.0       | 0.015                     | UL       | —              | —                           | —        |
|             | J1824-2452L  | 4.10            | 0.23           | 0.0       | 0.022                     | UL       | —              | —                           | —        |
| M22         | J1836-2354A  | 3.35            | 0.20           | 0.0       | 0.02                      | UL       | —              | —                           | —        |
| NGC 6749    | J1905+0154A  | 3.19            | 0.81           | 0.0       | 0.09                      | He(?)    | —              | —                           | —        |
| NGC 6752    | J1910-5959A  | 3.27            | 0.84           | <0.000 01 | 0.22                      | He       | —              | —                           | —        |
| NGC 6760    | J1911+0101A  | 3.62            | 0.14           | <0.000 13 | 0.02                      | UL       | —              | —                           | —        |

(续表)

| 球状星团 | 脉冲星         | 自转<br>周期<br>/ms | 轨道<br>周期<br>/d | 轨道偏心率     | 伴星<br>质量<br>/ $M_{\odot}$ | 伴星<br>类型 | 掩食<br>时长<br>占比 | 观测<br>频率<br>/MHz  | 系统<br>类型 |
|------|-------------|-----------------|----------------|-----------|---------------------------|----------|----------------|-------------------|----------|
| M71  | J1953+1846A | 4.89            | 0.18           | 0.0       | 0.032                     | UL       | 20%            | 1 400             | BW       |
| M15  | J2129+1210C | 30.53           | 0.34           | 0.681 395 | 1.13                      | NS       | —              | —                 | —        |
| M30  | J2140–2310A | 11.02           | 0.17           | <0.000 12 | 0.11                      | *        | 20%            | 575/820/<br>1 400 | RB       |

注: (?) 表示系统的伴星类型未知; 表后三列为掩食脉冲星的信息, — 表示该脉冲星没有掩食现象, \* 表示掩食脉冲星的伴星类型未知; BW 和 RB 分别表示 Black Widow 和 Redback 掩食双星系统。

图 7 给出球状星团中掩食射电脉冲双星系统的轨道周期和伴星质量分布, 可以看出掩食射电脉冲星 90% 以上处于紧密的双星系统中 ( $P_b < 24$  h), 其中 7 个是伴星质量 ( $M_c \ll 0.1 M_{\odot}$ ) 非常低的经典 BW 系统, 12 个是非简并伴星 ( $M_c \approx 0.2 M_{\odot}$ ) 的 RB 系统, 目前还无法确定 PSR J1721–1936 的系统类型, 根据伴星质量 ( $M_c \approx 0.13 M_{\odot}$ ) 预测其所在的双星系统可能属于 RB 系统。通过对脉冲星轨道周期和伴星质量进行拟合, 得到正相关关系为  $M_c = 0.26 P_b^{0.67}$ , 整体上具有较长轨道周期的掩食双星系统其伴星质量较大。由于球状星团射电脉冲星的自旋光度及其伴星的质量等很难精确测量, 目前对不同掩食双星的脉冲星风及掩食机制了解得不是很清楚。



注: 伴星质量通过质量函数得到, 假设脉冲星质量为  $1.35 M_{\odot}$ , 轨道倾角  $i = 60^{\circ}$ 。

图 7 球状星团掩食射电脉冲星轨道周期和伴星质量分布图



### 5.2.1 多频段掩食

在球状星团中观测到多个频段发生掩食的双星系统, 这些系统的轨道周期只有几小时。Ter 5 中 PSR J1748–2446A (Ter 5 A) 是一颗毫秒脉冲星 ( $P$  为 11.56 ms), 其圆形轨道的周期  $P_b$  为 1.8 h, 掩食时长占轨道周期的 10%。在频率 1 368 MHz (20 cm 波段) 和 728 MHz (40 cm 波段) 处, Ter 5 A 均观测到掩食现象, 但在 3 100 MHz (10 cm 波段) 上并没有发现掩食现象<sup>[28]</sup>, 说明有些脉冲星的掩食现象是随观测频率变化而变化。与之非常类似的掩食毫秒脉冲星还有 47 Tuc 中的 PSR J0024–7204J (47 Tuc J), 其近圆形轨道的周期  $P_b$  为 2.9 h, 在 436 MHz 和 640 MHz 这 2 个频段观测到占 25% 轨道周期的掩食现象<sup>[10]</sup>; M30 中的 PSR J2140–2310A (M30 A), 其近圆形轨道的周期  $P_b$  为 4 h, 在 575 MHz, 820 MHz 和 1 400 MHz 这 3 个频段观测到约占 20% 的轨道周期的较稳定掩食现象<sup>[47]</sup>。NGC 6342 中的 PSR J1721–1936 是一颗普通脉冲星 ( $P$  为 1 004.04 ms), 其近圆形轨道的周期  $P_b$  为 6.2 h, 在 408 MHz 和 606 MHz 这 2 个低频观测时, 整个轨道上都能观测到脉冲信号, 但在 1 404 MHz 和 1 660 MHz 这 2 个高频段处产生掩食现象, 其掩食持续时间尚不清楚<sup>[25]</sup>。

### 5.2.2 长时间掩食

从表 5 的掩食系统的统计信息中, 可发现 2/3 以上掩食系统的掩食时长低于 25% 的轨道周期, 但也观测到 4 个 RB 系统掩食持续时间较长 (掩食时长不小于 40% 的轨道周期), 且都是在高频段观测到的。球状星团 47 Tuc 中的 PSR J0024–7204V (47 Tuc V) 处于轨道周期  $P_b$  为 5 h 的双星系统中, 在 1 390 MHz 观测到掩食时长约占轨道周期的 50%<sup>[59]</sup>。对于 Ter 5 ad, 其轨道周期  $P_b$  为 26 h, 在高频 (2 GHz) 处观测到占 40% 轨道周期的不规则掩食, 有时掩食持续时间甚至更长<sup>[29]</sup>。NGC 6397 中 PSR J1740–5340A (NGC 6397A) 与一个较重的主序伴星 ( $M_c$  为  $0.22 M_\odot$ ) 处于轨道周期较长 ( $P_b$  为 1.35 d) 的双星系统中, 在 1 400 MHz 观测到其掩食时长大于 40% 的轨道周期<sup>[22]</sup>。相比之下, Ter 5 中的 PSR J1748–2446P (Ter 5 P) 具有更重的主序伴星 ( $M_c$  为  $0.44 M_\odot$ ), 在 1 400 MHz 观测到掩食时长占 50% 的轨道周期<sup>[34]</sup>。

### 5.2.3 掩食延迟现象

一些掩食双星系统中, 脉冲星的脉冲到达时间存在明显的时间延迟。M5 C 的轨道周期  $P_b$  为 2.1 h, 在 15% 的轨道上观测到规则的掩食, 且在掩食进口和出口处显示达到 0.2 ms 的掩食延迟<sup>[16]</sup>。47 Tuc V 表现出明显的不规则掩食, 掩食时长超过约 50% 的轨道周期, 在其他轨道阶段发生较短掩食, 有时伴随着时间延迟, 有时伴随着脉冲的扩大<sup>[59]</sup>。与之相似的系统还有 M28 中的 PSR J1824–2452H (M28 H) (延迟 2 ms)<sup>[60]</sup>, NGC 6440 中的 PSR J1748–2021D (NGC 6440 D) (延迟 1 ms)<sup>[27]</sup>, NGC 6397A (延迟 3 ms)<sup>[22]</sup>, NGC 6266 中的 PSR J1701–3006B (NGC 6266 B)<sup>[61]</sup> 和 M30 A<sup>[47]</sup> 的掩食时长不确定。这些掩食双星的掩食延迟主要是因为脉冲星上的高能粒子将伴星表面烧蚀而产生掩食星风, 当脉冲星的辐射信号穿过伴星微弱星风的电离物质时被吸收或散射所造成<sup>[11, 22, 61]</sup>。

大多数球状星团掩食双星系统搜寻是在 1 400 MHz 或更低频率下进行的,随着大型射电望远镜高频观测任务的进行,预期将发现更多掩食射电脉冲双星系统,这将加快人们对于掩食双星系统的认识。

## 6 总结与展望

球状星团射电脉冲星的特殊观测特性一直是人们研究的热点课题。自发现第一颗球状星团射电脉冲星至今已 30 多年,共发现了 150 颗,通过统计分析球状星团射电脉冲星族群的样本数据、基本性质、星团脉冲星的搜寻及有趣的双星系统,并在某些方面与非球状星团脉冲星进行比较,主要结论如下。

(1) 目前通过 Lovell, Parkes, Arecibo, GMRT 和 GBT 等各大型射电望远镜的搜寻,在 20 kpc 以内的 28 个球状星团中共观测到 150 颗射电脉冲星,约占已知射电脉冲星总数的 5%,其中 GBT 对球状星团射电脉冲星的观测做出的贡献最大。

(2) 球状星团射电脉冲星中 90% 以上是毫秒脉冲星,且毫秒脉冲星大多数处于双星系统中,这主要是由于在球状星团中除了原始双星的演化形成毫秒脉冲星外,星团核心内恒星的交互作用有利于毫秒脉冲星双星系统的形成。球状星团射电脉冲星的周期变化率  $\dot{P}$  为负值,其主要是受到球状星团引力势的加速效应的影响,这种  $\dot{P}$  为负值的特殊情况在银河系中出现的几率较小。目前球状星团孤立毫秒脉冲星的占比高于非球状星团孤立毫秒脉冲星的占比,而孤立毫秒脉冲星的形成机制目前并没有定论。

(3) 目前观测到的 157 个球状星团中,已观测到脉冲星的 28 个球状星团和未观测到脉冲星的系统均约 80% 分布在银纬  $\pm 30^\circ$  的范围内。对于距离较远且大多处于短周期双星系统中的射电脉冲星,由于受到观测的选择效应较难被发现。

(4) 球状星团脉冲星的伴星类型与非球状星团脉冲星相似,主要是 He 白矮星。观测到的球状星团 Black Widow 系统和 Redbacks 系统这两类掩食系统中,90% 以上是近圆形或圆形短周期双星系统。大多数掩食系统的掩食时间较短,但也观测到掩食时长不小于 40% 轨道周期的双星系统。观测到有些掩食双星在多个频段产生掩食现象,有些脉冲星存在掩食延迟现象,后者主要是脉冲星的辐射信号穿过伴星微弱的电离风时被吸收或散射导致的。对双星系统的掩食特征的观测研究有利于人们探索双星系统的脉冲星风和掩食机制等问题。

由于样本数据和相关观测资料的限制性,统计研究工作仍然存在一定的局限性。球状星团脉冲星的观测和研究充满机遇但也面临着巨大的挑战,相信我国高灵敏度大型射电望远镜 (FAST) 将成为发现球状星团脉冲星最灵敏的探测工具。

### 参考文献:

- [1] Harris W E. AJ, 1996, 112: 1487

- [2] Lyne A G, Brinklow A, Middleditch J, et al. *Nature*, 1987, 328: 399
- [3] <http://www.naic.edu/~pfreire/GCpsr.html>, 2019
- [4] <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/expert.html>, 2019
- [5] Backer D H C, Kulkarni S R, Heiles C, et al. *Nature*, 1982, 300: 615
- [6] Alpar M A, Cheng A F, Ruderman M A, et al. *Nature*, 1982, 300: 728
- [7] Pan Z, Hobbs G, Li D, et al. *MNRAS*, 2016, 459: L26
- [8] Manchester R N, Lyne A G, D'Amico N, et al. *Nature*, 1990, 345: 598
- [9] Manchester R N, Lyne A G, Robinson C, et al. *Nature*, 1991, 352: 219
- [10] Robinson C, Lyne A G, Manchester R N, et al. *MNRAS*, 1995, 274: 547
- [11] Camilo F, Lorimer D R, Freire P, et al. *ApJ*, 2000, 535: 975
- [12] Knight H S. PhD Thesis. Melbourne: Swinburne University of Technology, 2007: 146
- [13] Freire P C C, Ridolfi A, Kramer M, et al. *MNRAS*, 2017, 471: 857
- [14] Freire P C, Gupta Y, Ransom S M, et al. *ApJ*, 2004, 606: L53
- [15] Kulkarni S R, Anderson S B, Prince T A, et al. *Nature*, 1991, 393: 47
- [16] Hessels J W T, Ransom S M, Stairs I H, et al. *ApJ*, 2007, 670: 363
- [17] Wolszczan A, Kulkarni S R, Middleditch J, et al. *Nature*, 1989, 337: 531
- [18] Mott A J, Freire P C. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2003, 35: 1292
- [19] Lynch R S, Ransom S M. *ApJ*, 2011, 730: L11
- [20] Lyne A G, Biggs J D, Brinklow A, et al. *Nature*, 1988, 332: 45
- [21] Anderson S B. PhD Thesis. Pasadena: California Institute of Technology, 1993: 81
- [22] D'Amico N, Lyne A G, Manchester R N, et al. *ApJ*, 2001, 548: L171
- [23] Possenti A, D'Amico N, Manchester R N, et al. *ApJ*, 2003, 599: 475
- [24] Chandler A M. PhD Thesis. Pasadena: California Institute of Technology, 2003: 99
- [25] Lyne A G, Biggs J D, Harrison P A, et al. *Nature*, 1993, 361: 47
- [26] Manchester R N, Lyne A G, Johnston S, et al. *IAU*, 1989, 4892: 87
- [27] Freire P C C, Ransom S M, Bégin S, et al. *ApJ*, 2008, 675: 670
- [28] Lyne A G, Manchester R N, D'Amico N, et al. *Nature*, 1990, 347: 650
- [29] Hessels J W T, Ransom S M, Stairs I H, et al. *Science*, 2006, 311: 1901
- [30] Cadelano M, Ransom S M, Freire P C C, et al. *ApJ*, 2018, 855: 125
- [31] Andersen B C, Ransom S M. *ApJ*, 2018, 863: L13
- [32] Lyne A G, Mankelov S H, Bell J F, et al. *MNRAS*, 2000, 316: 491
- [33] Ransom S M. PhD Thesis. Cambridge: Harvard university, 2001: 74
- [34] Ransom S M, Hessels J W T, Stairs I H, et al. *Science*, 2005, 307: 892
- [35] Possenti A, D'Amico N, Manchester R N, et al. <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0108343.pdf>. *astro-ph/0108343*, 2001
- [36] Lynch R S, Ransom S M, Freire P C C, et al. *ApJ*, 2011, 734: 89
- [37] Bégin S. Master thesis. Vancouver: the University Of British Columbia, 2006: 54
- [38] D'Amico N, Bailes M, Lyne A G, et al. *MNRAS*, 1993, 260: L7
- [39] Biggs J D, Bailes M, Lyne A G, et al. *MNRAS*, 1994, 267: 125
- [40] Lynch R S, Freire P C C, Ransom S M, et al. *ApJ*, 2012, 745: 109
- [41] DeCesar M E, Ransom S M, Ray P S. <https://arxiv.org/pdf/1111.0365.pdf>, 2011
- [42] D'Amico N, Possenti A, Fici L, et al. *ApJ*, 2002, 570: L89
- [43] Freire P C C, Hessels J W T, Nice D J, et al. *ApJ*, 2005, 621 : 959
- [44] Wolszczan A, Kulkarni S R, Middleditch J, et al. *Nature*, 1989, 337: 531
- [45] Anderson S B, Gorham P W, Kulkarni S R, et al. *Nature*, 1990, 346: 42
- [46] Prince T A, Anderson S B, Kulkarni S R, et al. *ApJ*, 1991, 374: L41
- [47] Ransom S M, Stairs I H, Backer D C, et al. *ApJ*, 2004, 604: 328
- [48] 吴鑫基, 乔国俊, 徐仁新. 脉冲星物理. 北京: 北京大学出版社, 2018: 312
- [49] Rasio F A, Pfahl E D, Rappaport S, et al. *ApJ*, 2000, 532: L47

- [50] van den Heuvel E P J, Bonsema P T J. *A&A*, 1984, 139: L16  
[51] Kluzniak W, Ruderman M, Shaham J, et al. *Nature*, 1988, 334: 225  
[52] Ruderman M, Shaham J, Tavani M, et al. *ApJ*, 1989, 336: 507  
[53] Camilo F, Nice D J, Taylor J H. *ApJ*, 1993, 412: L37  
[54] Belczynski K, Bulik T, Bailyn C. *ApJ*, 2011, 742: L2  
[55] Freire P C C, Bassa C G, Wex N, et al. *MNRAS*, 2011, 412: 2763  
[56] Portegies Zwart S, van den Heuvel E P J, van Leeuwen J, et al. *ApJ*, 2011, 734: 55  
[57] Camilo F, Rasio F A. *ASP Conf.Ser.*, 2005, 325: 147  
[58] Ransom S M. *IAU Symposium*, 2007, 3: 291  
[59] Ridolfi A, Freire P C C, Torne P, et al. *MNRAS*, 2016, 462: 2918  
[60] Pallanca C, Dalessandro E, Ferraro F R, et al. *ApJ*, 2010, 725: 1165  
[61] Possenti A, D'Amico N, Manchester R N, et al. *ApJ*, 2003, 599: 475

## Statistical Research on Radio Pulsars in Globular Clusters of the Milky Way

ZHENG Jiao, YOU Xiao-peng

*(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)*

**Abstract:** Globular clusters are one of the oldest celestial systems in the Milky Way. The core of the cluster with extremely high density of stars is benefit to exchange the matter between the binary stars. So it is relatively easy to form the binary systems such as millisecond binary pulsars, eclipsing binary pulsars, main sequence-millisecond binary pulsars, and binary pulsars with high orbital eccentricity. According to study these systems, we can further understand the properties of the dynamics of globular clusters, the evolution of binary systems and the interstellar medium. Since the first radio pulsar in a globular cluster was found 30 years ago, astronomers have made great progress in the observation and theoretical research of radio pulsars in globular cluster by using the radio telescope with high sensitivity and the improvement of the ability of data processing. In this paper, we collect and analyze a large number of newest data of radio pulsars in globular clusters. We research the basic properties of the rotation period and the orbit period of these pulsars, and discuss the searching of radio pulsars in globular clusters. Finally, we statistically analyze the binary pulsars in globular clusters, including the distribution of pulsars with the different companion stars and the properties of the eclipsing pulsars.

**Key words:** globular clusters; radio pulsars; statistical research