

旋转射电暂现源物理参数的统计研究*

吴晨斌^{1,2} 李威^{1,2} 蔡沿庆^{1,2} 李清莹^{1,2} 余志祥^{1,2} 党世军^{1,2†}
尚伦华^{1,2‡}

(1 贵州师范大学物理与电子科学学院 贵阳 550025)

(2 贵州省射电天文数据处理重点实验室 贵阳 550025)

摘要 旋转射电暂现源被发现已有将近20 yr, 但是其具体的起源仍然不够清楚. 该文通过收集文献共找到182颗已发现的旋转射电暂现源, 更新了旋转射电暂现源数据库, 并对旋转射电暂现源的空间位置、周期、周期导数、色散量、距离、特征年龄、特征磁场、法拉第旋转变量以及线偏振度等观测参数进行统计分析, 发现除了法拉第旋转变量, 其他所有以上观测参数的对数均服从正态分布. 与脉冲星相比, 旋转射电暂现源的空间位置和脉冲星相近, 周期和周期导数以及表面磁场的平均值比普通脉冲星略大, 特征年龄和法拉第旋转变量位于正常脉冲星范围, 自转能损率、色散值以及距离比脉冲星更小. 这些结果对于研究旋转射电暂现源的物理起源问题具有重要意义.

关键词 恒星: 脉冲星: 普通, 脉冲星: 旋转射电暂现源, 方法: 数据分析

中图分类号: P144; **文献标识码**: A

1 引言

与光学望远镜的悠久历史相比, 射电天文观测到目前为止仅有80多年的历史, 但仅仅过了三十年便进入了射电天文发展的鼎盛时期. 自Hewish等^[1]发现第1颗脉冲星以来, 望远镜高时间分辨率技术的实现为研究动态的射电天空提供了机会, 这也开辟了快速无线电瞬变源这一尚未探索的领域. 近年来在射电波段已发现许多射电瞬变源, 比如间歇脉冲星^[2]、快速射电暴(Fast Radio Burst, FRB)^[3]、旋转射电暂现源(Rotating Radio Transient, RRAT)^[4]等. 由于RRAT的辐射通常是零星的单脉冲爆发, 因此搜寻RRAT只能通过单脉冲搜寻的方法, 而

不能像搜寻脉冲星一样使用周期搜寻的方法. 首颗RRAT是由McLaughlin等^[4]于2006年使用澳大利亚Parkes 64 m射电望远镜运用单脉冲搜寻技术发现. 在RRAT发现之后, 人们通过周期搜寻以及脉冲星计时观测发现, 这种新型天体和脉冲星一样具有准确的周期和周期变化率. 后来经过调查研究发现它也属于快速自转的中子星中的一种, 可能是演化到某个阶段的脉冲星^[4-6].

截止到2023年6月, 人们已经发现了182颗RRAT (详见附录). RRAT有以下特征: 其周期范围在0.1 s到7 s之间, 单个脉冲爆发的持续时间从0.5 ms到100 ms之间不等, 流量密度分布也较广, 在10 mJy到10 Jy之间^[5], 并且旋转射电暂现

2023-12-27收到原稿, 2024-04-24收到修改稿

*新疆维吾尔自治区重大科技专项(No. 2022A03013-4), 贵州省科技计划项目(黔科合-基础-ZK[2022]一般304), 贵州省教育厅高等学校科学研究项目(黔教计[2022]132号、[2022]137号), 贵州师范大学学术新苗基金项目(黔师新苗[2022]B18号)资助

†dangsj@gznu.edu.cn

‡lhshang@gznu.edu.cn

源的脉冲宽度和普通脉冲星也相同^[6], 其相邻脉冲之间间隔也从几分钟到几十小时之间不等^[4-7]. 尽管RRAT被发现已有近二十年, 但是目前其物理起源并没有得到很好的解释. 有各种理论用于解释RRAT的起源问题, 比如: Burke-Spolaor和Bailes^[6]认为, RRAT是脉冲星的晚期演化阶段; Wang等^[8]认为RRAT是极端的零脉冲的脉冲星; Li^[9]和Luo等^[10]的理论指出, 旋转射电暂现源是一种已经死亡了的脉冲星, 是脉冲星磁层与周围物质相互作用的结果.

关于RRAT的本质, 到目前为止仍无定论. 因此, 对RRAT的各种参数进行统计研究, 对于研究其起源与演化具有至关重要的作用. 但是前人对旋转射电暂现源的统计研究却少之又少. 因此, 本文通过收集文献中已发现的RRAT的数据更新了旋转射电暂现源数据库, 并对旋转射电暂现源的空间位置、周期、周期导数、色散量、特征年龄、特征磁场、法拉第旋转量以及线偏振度等观测参数进行统计分析, 并与脉冲星的相关参数进行比较, 为研究RRAT的起源与演化问题提供统计证据.

2 RRAT相关参数数量统计

通过收集文献, 本文共找到182颗已知的RRAT. 附录表1展示了这182颗RRAT的相关参数, 从左到右每列分别为RRAT的名称、赤经(RA)、赤纬(DEC)、银经(GL)、银纬(GB)、色散量(DM)、周期(P)、周期导数(\dot{P})、表面磁场 B_{surf} 、自转能损失率 \dot{E} 、特征年龄 τ_c 、爆发率(Burst rate)、距离(Distance)、法拉第旋转量(RM)、线偏振度(Degree of linear polarization, L/I)以及各参数对应的参考文献. 本文工作对RRAT数据库进行更新, 并对其已确定的各观测参数进行统计, 结果如图1所示, 发现其中大多数RRAT的色散量、距离和空间位置是确定的. 结合文献中给出的色散量和YMW16银河系电子密度模型^[11], 本文重新计算了RRAT的距离. 另外, 只有101颗RRAT给出了爆发率, 119颗RRAT获得了准确周期, 55颗RRAT获得了周期导数、特征年龄、表面磁场以及自转能损失率, 23颗RRAT给出了法拉第旋转量, 22颗RRAT给出了线偏振度. 以上各参数中, 有些RRAT没有探测到周期以及爆

发率, 主要是因为只探测到了一次爆发, 或者爆发率变化较大. 周期导数、特征年龄、表面磁场以及自转能损失率则需要进行长期的计时观测才能获得. 法拉第旋转和线偏振度则需要进行偏振观测来获得. 由于RRAT稀少的单脉冲爆发以及之前的望远镜灵敏度不足, 增加了获得以上各参数的难度. 500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)作为目前全世界最灵敏的射电望远镜, 将有能力对其天区内的RRAT进行长期的计时观测以及单脉冲偏振观测, 从而确定以上各参数, 为研究RRAT的起源与演化问题以及辐射机制提供重要的观测证据.

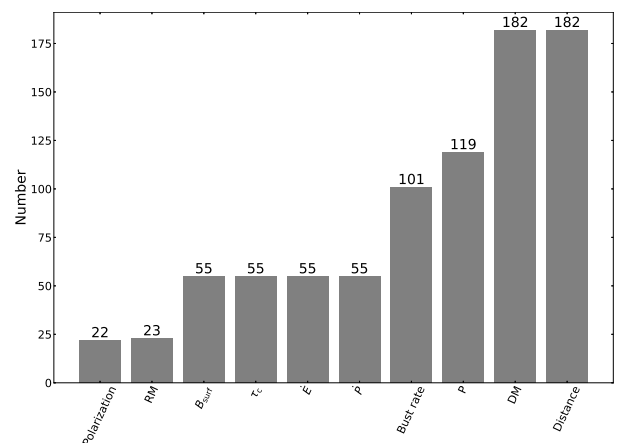


图1 RRAT已确定的各观测参数统计, 数据来自附录表1. 从左到右分别为偏振(Polarization)、法拉第旋转量(RM)、偶极表面磁场(B_{surf})、特征年龄(τ_c)、自转能损失率(\dot{E})、周期导数(\dot{P})、爆发率(Burst rate)、周期(P)、色散量(DM)、距离(Distance).

Fig. 1 Statistics of the determined observation parameters of the rotating radio transient, all of the data are from Table 1 of appendix. From left to right, they are Polarization, Rotation measure (RM), Dipolar surface magnetic field (B_{surf}), Characteristic age (τ_c), Spin-down energy loss rate (\dot{E}), Period derivative (\dot{P}), Burst rate, Period (P), Dispersion measure (DM), and Distance, respectively.

3 RRAT的空间位置分布

过去对脉冲星空间位置的分布统计发现大部分的普通脉冲星集中分布在银盘附近, 而更年老的毫秒脉冲星则弥散分布在整个天球区域^[12-13]. 脉冲星的空间位置分布对于研究其演化历史意义重大. RRAT是最近十几年才被发现的一种新型暂现

源, 后来发现它和脉冲星有着千丝万缕的联系, 其具体的物理起源尚未明确. 因此, 研究RRAT的空间位置分布对于探索其本质及其早期演化具有重要意义. 图2是182颗RRAT和3700颗脉冲星在银道坐标系的空间位置分布, 黑色五角星和灰色圆点分别代表RRAT和脉冲星, 其中脉冲星的数据来自 Australia Telescope National Facility (ATNF) Pulsar Catalogue¹. 可以看出, 大约有二分之一的RRAT分布在银盘附近, 有一小部分则分布在高银纬区域, 其余的则弥散分布在天球中. 为了进一步

揭示RRAT的空间位置分布与其他参数之间的关系, 本文分别分析了已测出周期导数的55颗RRAT和3700颗脉冲星的周期、特征年龄、特征磁场及自转能损率与其银纬的相关性. 如图3所示, 可以看出RRAT和脉冲星类似, 它们的周期都与银纬没有明显的相关性, 特征年龄与银纬整体上呈正相关, 而特征磁场与自转能损率与银纬整体上呈反相关. 这表明, RRAT和脉冲星一样, 在漫长的演化过程中, 大部分年龄较大的RRAT由于自行运动, 导致其偏离了银盘.

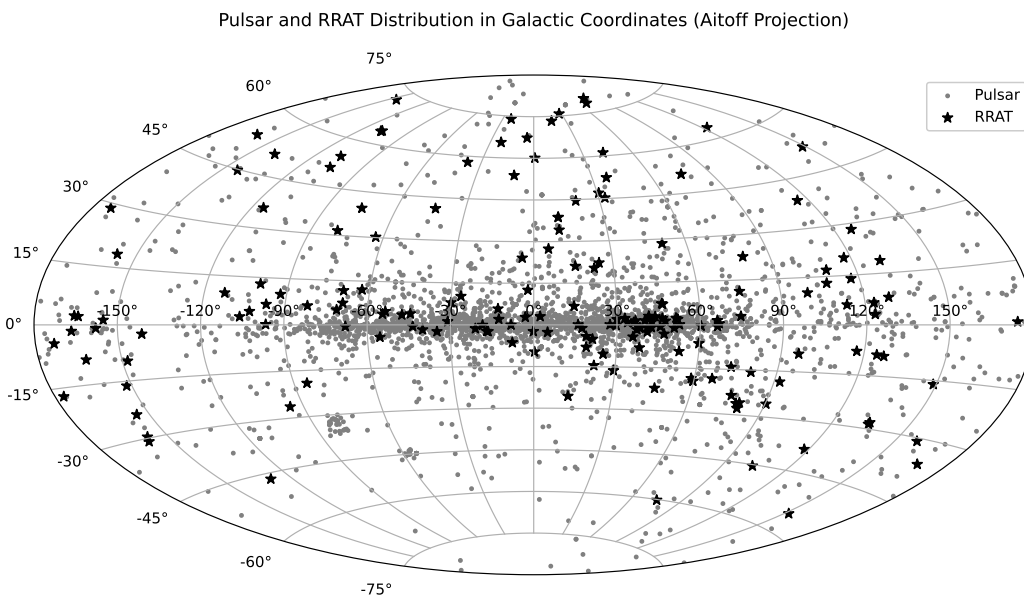


图2 182颗RRAT与3700颗脉冲星的空间位置分布. 黑色五角星为RRAT, 灰色圆点为脉冲星.

Fig. 2 The spatial distribution of 182 RRATs and 3700 pulsars. The black star is the RRAT, and the grey circle is the pulsar.

4 RRAT在周期和周期导数图上的分布

周期和周期导数图($P - \dot{P}$)对于研究RRAT的物理性质及其演化过程具有重要意义. 图4给出了RRAT、脉冲星、磁陀星、间歇脉冲星以及消零脉冲星在 $P - \dot{P}$ 图上的分布情况. 本文也画出等磁场线, 等年龄线以及死亡线. 其中磁场强度是由公式

$$B_{\text{surf}} = 3.2 \times 10^{19} \sqrt{P\dot{P}} \text{ Gs}, \quad (1)$$

¹<https://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/index.html>

计算得出^[14], 而特征年龄是由公式

$$\tau_c = P/(2\dot{P}) \cong 15.8 \text{ Myr} \left(\frac{P}{\text{s}}\right) \left(\frac{\dot{P}}{10^{-15}}\right)^{-1}, \quad (2)$$

计算得到. 此外, 本文也绘制了3种不同类型的死亡线, 由Chen和Ruderman于1993年定义(CR93)^[15]了第1种死亡线, 其死亡线方程为

$$4 \lg B_{\text{surf}} - 7.5 \lg P = 49.3. \quad (3)$$

第2种和第3种死亡线都是由Zhang等^[16]研究了两种模型后得出, 其中第2种是在真空间隙模型

(简称“CR_V”模型)下的偶极磁场的死亡线公式为

$$\lg \dot{P} = 2.75 \lg P - 14.62, \quad (4)$$

第3种是在CR_SCLF模型下偶极磁场的死亡线公式为

$$\lg \dot{P} = 2.5 \lg P - 14.56. \quad (5)$$

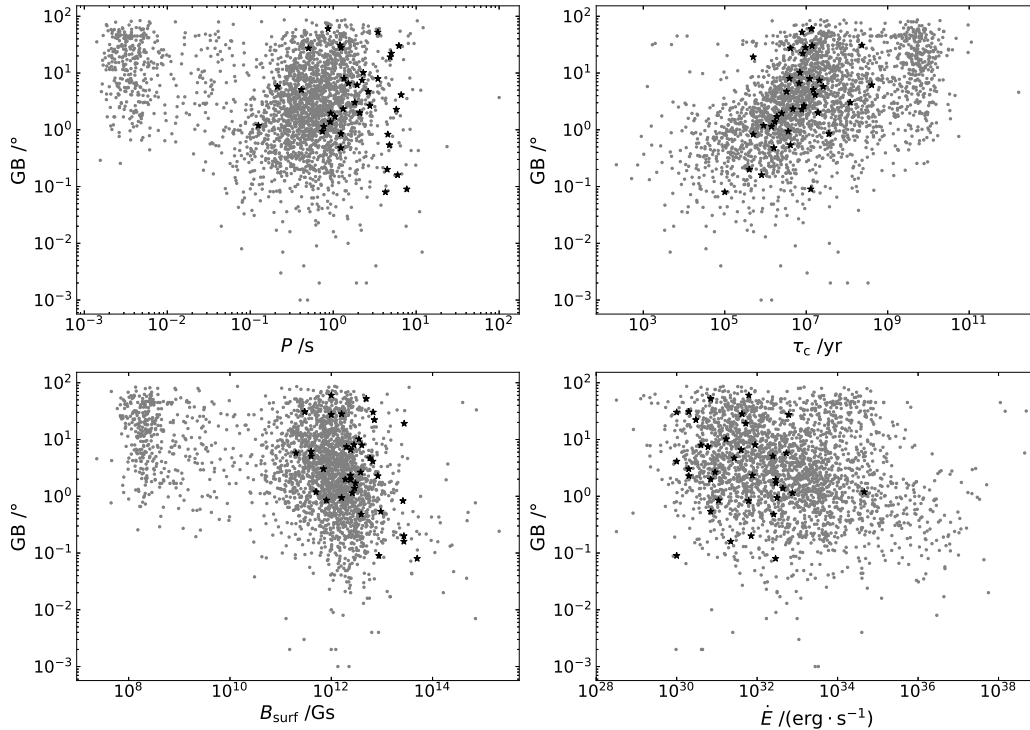


图 3 55颗RRAT与3700颗脉冲星的周期、特征年龄、特征磁场及自转能损率与其银纬的相关性散点图，黑色五角星为RRAT，灰色圆点为脉冲星。

Fig. 3 Correlation between Period, Characteristic Age, Characteristic Magnetic Field and Spin Energy Loss Rate of 55 RRATs and 3700 Pulsars and their galactic latitude. The black stars represent RRATs, and the grey dots represent pulsars.

从图4可以看出，RRAT在 $P - \dot{P}$ 分布图较弥散，但都位于普通脉冲星的范围，与间歇脉冲星和零脉冲星接近，且有4颗RRAT的位置靠近磁陀星，分别为RRAT J1840-0840^[17]、RRAT J0736-6304²、RRAT J1819-1458²和RRAT J1854+0306²，它们的特征磁场强度都高达 10^{13} Gs，RRAT J1819-1458中探测到了X射线辐射^[18]以及两次周期跃变事件，并且第2次周期跃变事件导致了明显且长期的自转减慢率减小^[19]。Lyne等^[19]认为，如果这样的周期跃变事件每30 yr发生一次，RRAT J1819-1458的自转减慢速率以及由此推导出的磁偶极矩将在几千年的时间尺度上降至零，这意味着RRAT

²<http://astro.phys.wvu.edu/ratalog>

J1819-1458可能在 $P - \dot{P}$ 图上的磁陀星区域开始其生命周期，暗示着RRAT可能是磁陀星向脉冲星演化的过渡阶段。

脉冲星靠其自身的自转能来提供电磁辐射，随着脉冲星年龄的增长，其自转能逐渐减弱，周期逐渐变长，此时脉冲星的辐射也渐渐变弱。当脉冲星自转能减弱到一定程度后，其辐射也会渐渐变弱直到停止，此时射电脉冲星宣告“死亡”。在死亡线以下的脉冲星将无法向外辐射，所以死亡线也被定义为脉冲星是否能辐射的临界点。Li^[9]认为RRAT是即将死亡的脉冲星，其辐射来自脉冲星磁层与外部尘埃盘的相互作用，这意味着RRAT的位置应当位

于死亡线之下.

然而, 从图4可以看到仅仅只有一颗RRAT J2311+67^[20] (或者PSR J2310+6706, 图4中红色五角星)刚好越过了这3种标准的死亡线, 有少数临近死亡线, 且在死亡线之上. 这表明大多数的RRAT是活跃的脉冲星, 并不太符合Li^[9]的理论预期. 遗憾的是, 截至目前人们并未获得RRAT J2311+67的流量密度等相关参数, 但测得了其爆发率为每小时60次, 希望在未来的观测中对其进行更深入的

单脉冲偏振观测, 进而研究其辐射机制. 此外, 从图4还可以看出, RRAT的位置与大多数消零脉冲星重叠, 这进一步支持Wang等^[8]提出的脉冲星是具有很大消零比的脉冲星这一说法. 当然, 本文的结论仅仅是基于55颗已得到周期的RRAT的统计结果, 未来还需要对RRAT进行大样本的脉冲星计时观测, 研究其自转规律, 得到其周期导数等重要参数, 进而为RRAT的起源问题提供重要线索.

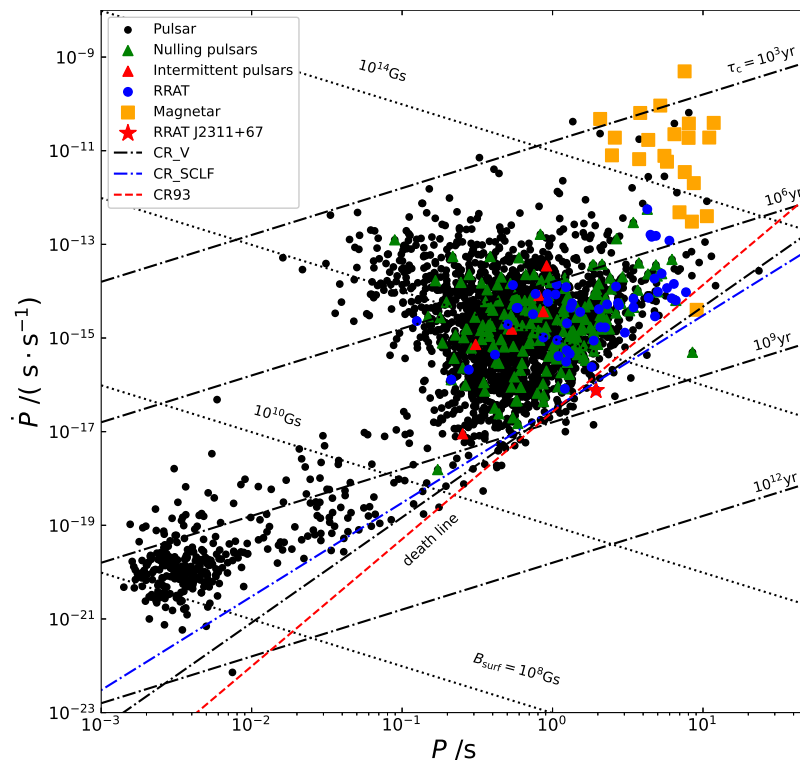


图4 脉冲星、间歇脉冲星、消零脉冲星、磁陀星和RRAT在周期和周期导数图上的分布. 图中黑色点线为等年龄线, 黑色虚线为等磁场线, 红色、蓝色和黑色点线分别为CR93、CR_SCLF和CR_V模型对应的死亡线.

Fig. 4 The distribution of pulsars, intermittent pulsars, nulling pulsars, magnetars and RRATs on periodic and periodic derivative graphs. In the figure, the black dotted line is the iso-age line, the black dashed line is the iso-magnetic field line, and the red, blue and black dotted lines are the death lines of CR93, CR_SCLF and CR_V models, respectively.

5 各种参数统计分布

为了进一步分析RRAT和脉冲星的演化关系, 本文对RRAT的空间位置、周期、周期导数、色散量、特征年龄、特征磁场、法拉第旋转量、线偏振度等观测参数进行了统计分析, 并与脉冲

星的相关参数进行比较. 在分析过程中, 所有的参数都使用归一化后的概率密度直方图, 同时给出了对应的累计分布. 具体如下: 图5展示了RRAT和脉冲星的周期对数($\lg P$)分布概率密度直方图和累计直方图, RRAT的 $\lg P$ 分布大致呈

高斯分布(均值为0.17, 标准差为0.47). 脉冲星的 $\lg P$ 分布为双高斯分布, 其中第1个高斯成分为毫秒脉冲星(均值为-2.42, 标准差为0.22), 第2个高斯成分为正常脉冲星(期望为-0.20, 标准差为0.38). 显然, RRAT的 $\lg P$ 分布位于普通脉冲星 $\lg P$ 的分布范围, 但总体上比脉冲星周期略长.

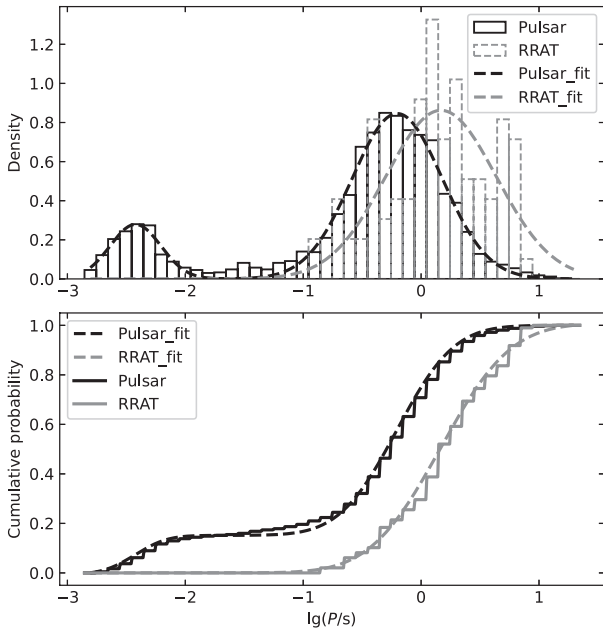


图5 脉冲星和旋转射电暂现源周期对数的分布. 上面子图为概率密度直方图, 下面子图为对应的累计直方图. 黑色和灰色分别代表脉冲星和旋转射电暂现源, 虚线为对应的拟合曲线.

Fig. 5 Logarithmic distribution of period of pulsars and RRATs. The upper panel is the probability density histogram, and the lower panel is the corresponding cumulative histogram. Black and grey represent the pulsars and RRATs respectively, and the dashed line is the corresponding fitting curve.

周期导数是描述脉冲星自转变化快慢的物理量, 周期导数越大, 脉冲星自转变化越快, 相同时间的转动能损失越多, 而损失的转动能转化为对外辐射的强弱. 图6展示了RRAT和脉冲星周期导数的对数($\lg \dot{P}$)分布的概率密度直方图和累计直方图. 通过拟合发现, RRAT的 $\lg \dot{P}$ 呈单高斯分布, 其均值和标准差分别为-14.2和0.36. 而脉冲星的 $\lg \dot{P}$ 呈双高斯分布, 其中毫秒脉冲星的 $\lg \dot{P}$ 均值为-19.84和-14.2, 标准差为0.51, 正常脉冲星 $\lg \dot{P}$ 的分布均

值和标准差分别为-14.65和0.93. 以上结果说明RRAT的周期导数和正常脉冲星周期导数分布一致.

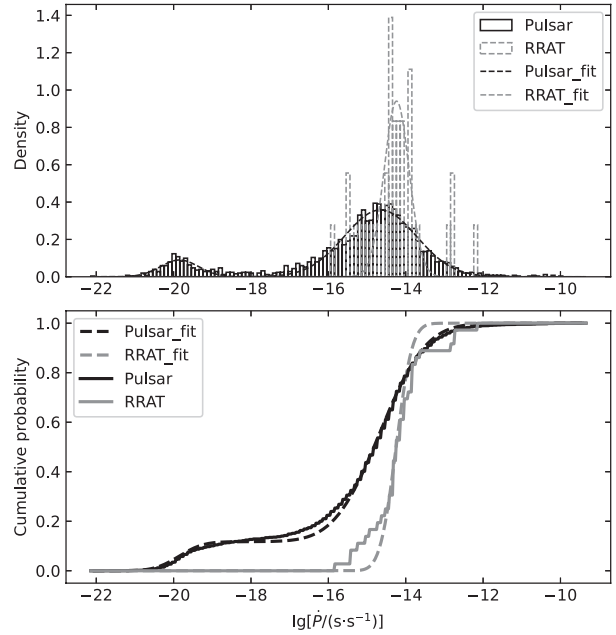


图6 RRAT和脉冲星周期导数对数的分布. 上面子图为概率密度直方图, 下面子图为对应的累计直方图. 黑色和灰色分别代表脉冲星和RRATs, 虚线为对应的拟合曲线.

Fig. 6 Logarithmic distribution of periodic derivative of RRATs and pulsars. The upper panel is the probability density histogram, and the lower panel is the corresponding cumulative histogram. Black and grey represent the pulsars and RRATs respectively, and the dashed line is the corresponding fitting curve.

脉冲星和RRAT的转动能损率计算公式为

$$\dot{E} \cong 3.95 \times 10^{24} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \left(\frac{\dot{P}}{10^{-15}} \right) \left(\frac{P}{\text{s}} \right)^{-3}. \quad (6)$$

图7展示了RRAT和脉冲星的转动能损率对数($\lg \dot{E}$)分布情况. 从图中可以看出 $\lg \dot{E}$ 的大小和周期导数成正比, 和周期的三次方成反比. 而转动能损率提供中子星转动的转动能. RRAT和脉冲星 $\lg \dot{E}$ 均为高斯分布, 通过拟合得到RRAT的 $\lg \dot{E}$ 分布的均值与标准差分别为31.79和1.23, 脉冲星的 $\lg \dot{E}$ 的均值与标准差分别为34.29和1.52. 二者相比, RRAT的 \dot{E} 更小.

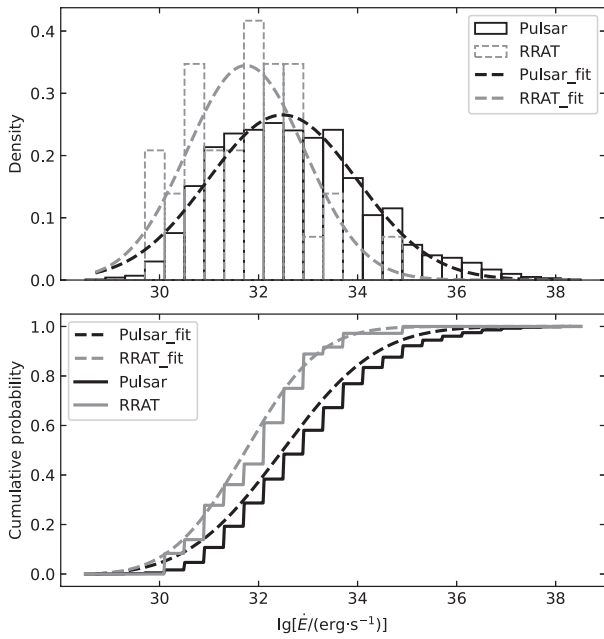


图 7 RRAT和脉冲星自转能损率对数的分布. 上面子图为概率密度直方图, 下面子图为对应的累计直方图. 黑色和灰色分别代表脉冲星和RRATs, 虚线为对应的拟合曲线.

Fig. 7 Logarithmic distribution of RRATs and pulsars spin energy loss rate. The upper panel is the probability density histogram, and the lower panel is the corresponding cumulative histogram. Black and grey represent the pulsars and RRATs respectively, and the dashed line is the corresponding fitting curve.

脉冲星由于通过损失自转能而向外辐射, 其自转速度逐渐减慢, 因此其自转和年龄之间存在严格的对应关系. 利用脉冲星的自转周期及其一阶导数, 天文学家们可估算出它的“出生时间”, 即脉冲星的特征年龄(τ_c , 见(2)式), 一般认为这也是脉冲星的真实年龄. 图8展示了RRAT和脉冲星的特征年龄对数($\lg \tau_c$)的分布直方图, RRAT的 $\lg \tau_c$ 为单峰分布, 脉冲星的 $\lg \tau_c$ 为双峰分布. 通过高斯拟合可以得到RRAT的 $\lg \tau_c$ 分布的均值为6.55, 标准差为0.61. 脉冲星 $\lg \tau_c$ 分布的均值分别为6.79和9.72, 对应的标准差为1.04和0.37. 显然, RRAT的特征年

龄位于正常脉冲星的年龄范围.

磁场强度是描述天体形成的重要物理参数, 也是天体演化的一个重要参考依据. 图9展示了RRAT和脉冲星的偶极表面磁场对数($\lg B_{\text{surf}}$)分布情况. 从图中可以看出, RRAT的 $\lg B_{\text{surf}}$ 呈单峰分布(均值为12.51, 标准差为0.64), 脉冲星的 $\lg B_{\text{surf}}$ 为双峰分布, 两峰分别对应普通脉冲星(均值为12.08, 标准差为0.49)和毫秒脉冲星(均值为8.33, 标准差为0.27). 大部分RRAT的磁场强度和普通脉冲星的强度相当, 但有一部分比脉冲星略强, 达到 10^{13} Gs, 接近磁陀星的磁场强度.

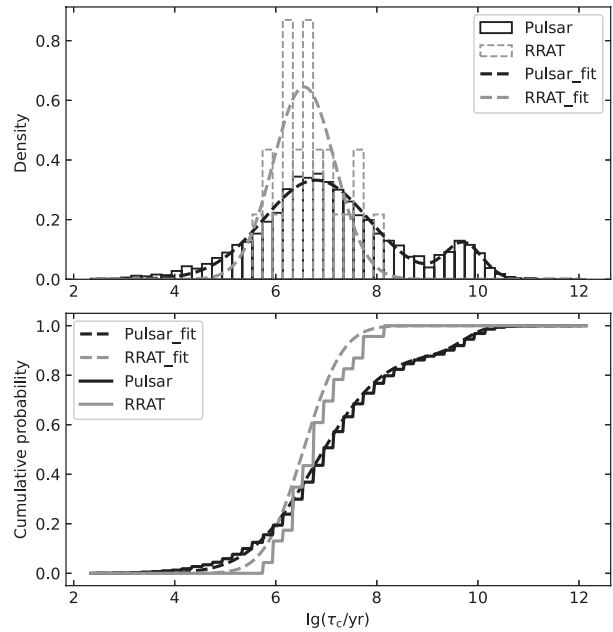


图 8 RRAT和脉冲星的特征年龄对数的分布. 上面子图为概率密度直方图, 下面子图为累计直方图. 黑色和灰色分别代表脉冲星和RRAT, 虚线是对应的拟合曲线.

Fig. 8 Logarithmic distribution of characteristic ages of RRATs and pulsars. The upper panel is the probability density histogram, and the lower panel is the corresponding cumulative histogram. Black and grey represent the pulsars and RRATs respectively, and the dashed line is the corresponding fitting curve.

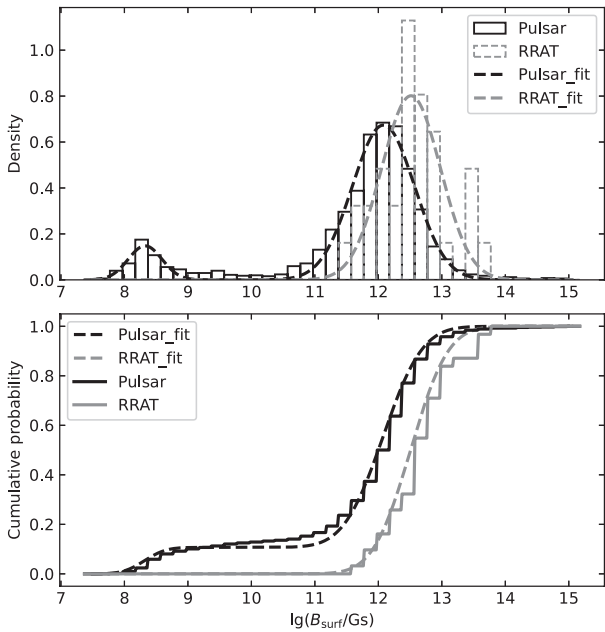


图 9 RRAT和脉冲星的磁场强度对数的分布. 上面子图为概率密度直方图, 下面子图为累计直方图. 黑色和灰色分别代表脉冲星和RRAT, 虚线是对应的拟合曲线.

Fig. 9 Logarithmic distribution of magnetic field strength of RRATs and pulsars. The upper panel is the probability density histogram, and the lower panel is the corresponding cumulative histogram. Black and grey represent the pulsars and RRATs respectively, and the dashed line is the corresponding fitting curve.

脉冲星发射的脉冲信号在穿越银河系时, 会经过多种不同介质, 这些介质具有不同的电子密度和电离度, 导致脉冲信号的传播速度发生变化, 从而引起脉冲形状的改变, 这种现象被称为色散. 色散量的计算公式为:

$$DM = \int_0^d n_e dl, \quad (7)$$

其中 l 是给定视线方向上的路径长度, d 是脉冲星到地球的直线距离, n_e 是电子数密度. 通过色散量, 可以计算出脉冲星到观测者的距离. 图10和图11分别展示了RRAT及脉冲星的DM与距离对数的分布直方图. 由于大多数RRAT的距离分别来自“NE2001”模型^[21]和YMW16模型³中的一个, 为统一起见, 本文使用YMW16重新计算获得了所有RRAT的距

³<https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/ymw16/>

离, 脉冲星的DM和距离均来自ANTF Pulsar Catalogue. 从图10和图11分别可以看出, 与脉冲星类似, RRAT的DM对数($\lg DM$)和距离($\lg \text{Distance}$)也呈现出单高斯分布, 其平均值比脉冲星的 $\lg DM$ 与 $\lg \text{Distance}$ 的平均值略小, RRAT的距离整体小于10 kpc. 有理论认为RRAT是距离地球很远的辐射巨脉冲的脉冲星, 由于距离太远, 只能探测到巨脉冲, 而探测不到辐射较弱的普通脉冲^[22]. 但是从本文的统计结果来看, 无论是DM还是距离, RRAT都要小于脉冲星, 所以这个结论和上述理论并不一致. 当然, 也不排除可能是RRAT的爆发率低, 整体上辐射较弱的缘故. 到目前为止, 已有的观测很少探测到DM比较大的RRAT, 相信今后使用更高灵敏度的望远镜可能探测到更远距离的RRAT.

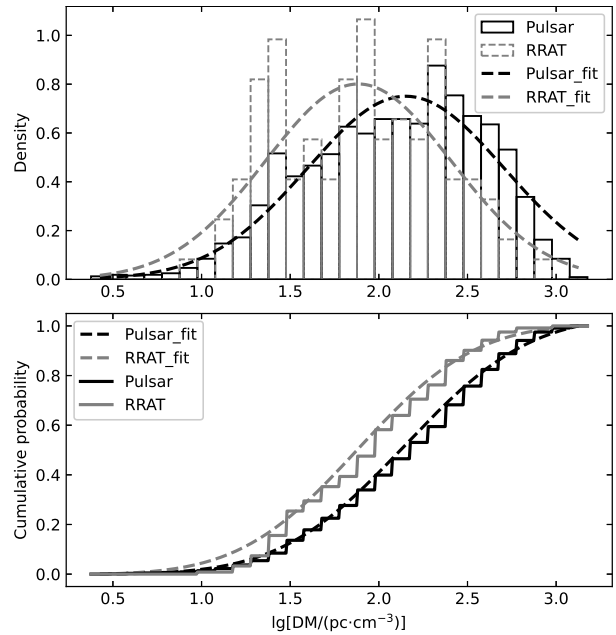


图 10 脉冲星和旋转射电暂现源色散量对数的分布. 上面子图为概率密度直方图, 下面子图为对应的累计直方图. 黑色和灰色分别代表脉冲星和旋转射电暂现源, 虚线为对应的拟合曲线.

Fig. 10 Logarithmic distribution of dispersion of pulsars and RRATs. The upper panel is the probability density histogram, and the lower panel is the corresponding cumulative histogram. Black and grey represent the pulsars and RRATs respectively, and the dashed line is the corresponding fitting curve.

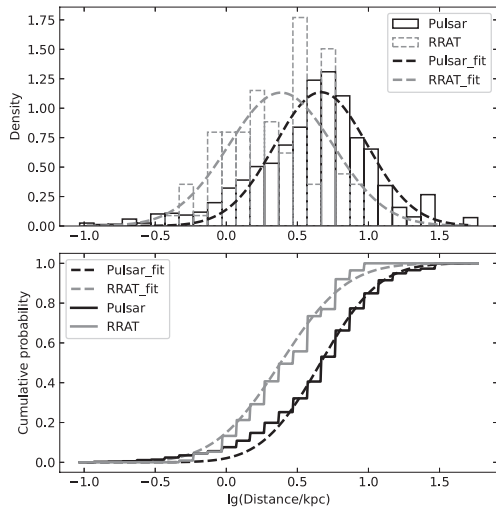


图 11 脉冲星和旋转射电暂现源距离对数的分布. 上面子图为概率密度直方图, 下面子图为对应的累计直方图. 黑色和灰色分别代表脉冲星和旋转射电暂现源, 虚线为对应的拟合曲线.

Fig. 11 Logarithmic distribution of distance of pulsars and RRATs. The upper panel is the probability density histogram, and the lower panel is the corresponding cumulative histogram. Black and grey represent the pulsars and RRATs respectively, and the dashed line is the corresponding fitting curve.

通过对脉冲星偏振信息的观测研究, 可以进一步了解到脉冲星的辐射机制、周围环境、磁场结构以及限制脉冲星辐射区的几何机构等. 而之前的观测发现, RRAT J1819-1458 的偏振位置角发生了 90° 跳变^[23], RRAT J0139+3336 的偏振位置角表现出了经典的“S”形曲线^[24]. 另外, 相关研究^[25-26]表明, RRAT 的偏振跟普通脉冲星类似. 因此, 偏振分析对于研究 RRAT 的辐射机制及辐射几何同样重要. 但是由于 RRAT 的爆发率较低且辐射流量也较弱, 对 RRAT 进行偏振研究非常依赖于望远镜的灵敏度, 因此只有 22 颗 RRAT 给出了偏振测量结果. 并且, 这 22 颗 RRAT 用于测得其线偏振度的积分轮廓都只由少量量子积分构成, 其中 RRAT J1048-5838 的偏振度为单脉冲的线偏振度, 其余 RRAT 的积分轮廓由 2-41 个单脉冲组成^[25]. 图 12 展示了这 22 颗 RRAT 和脉冲星线偏振度的对数分布, 从图中可以看出二者都呈单高斯分布, 但 RRAT 的线偏振度整体上比脉冲星略高. RRAT 线偏振度较高的原因除其背后可能的物理机

制之外, 还可能是因为此处脉冲星的线偏振度是其积分轮廓的线偏振度, 而 RRAT 的脉冲比较稀少, 有些 RRAT 仅仅是测出了其单脉冲的线偏振度, 或尽管是积分轮廓的线偏振度, 但是其积分轮廓仅由少量单脉冲构成. RRAT 也有可能和普通脉冲星一样, 尽管单脉冲的线偏振度较高, 但是由上百个单脉冲构成的积分轮廓的线偏振度并不高^[25-26], 这需要后期使用高灵敏度的射电望远镜进行长时间观测, 以获得稳定的积分轮廓去证实.

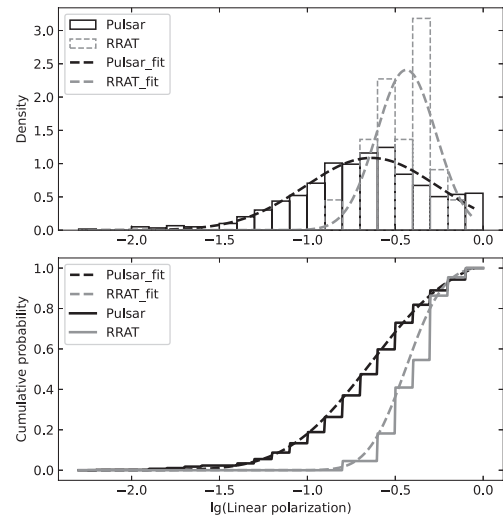


图 12 RRAT 和脉冲星的线偏振度对数的分布. 上面子图为概率密度直方图, 下面子图为累计直方图. 黑色和灰色分别代表脉冲星和 RRAT, 虚线为对应的拟合曲线.

Fig. 12 Logarithmic distribution of linear polarization of RRATs and pulsars. The upper panel is the probability density histogram, and the lower panel is the corresponding cumulative histogram. Black and grey represent the pulsars and RRATs respectively, and the dashed line is the corresponding fitting curve.

法拉第旋转量在脉冲星研究中也是十分重要的观测量之一, 该观测量可以反映出视线方向上脉冲星到观测者之间的磁场方向. RM 可用如下公式求得,

$$RM = \frac{e^2}{2\pi m_e^2} \times \int_0^d n_e B_{\parallel} dl, \quad (8)$$

其中 n_e 是自由电子密度, e 是基本电荷, m_e 是电子的质量, B_{\parallel} 是沿着视线方向的磁场, l 是给定视线方向上的路径长度, d 是脉冲星到地球的直线距离.

如果测得的RM为正值,则表明磁场方向朝向观测者;如果测得的RM为负值,则表明磁场方向背向观测者.对脉冲星和RRAT而言,利用RM可以直接揭示银河系银盘大范围的磁场结构^[27].图13展示了RRAT和脉冲星的法拉第旋转量绝对值的对数($\lg |RM|$)分布情况,尽管RRAT的 $\lg |RM|$ 值数量较少,其分布不具有代表性,但仍然可以看出二者均为单峰分布,RRAT的 $\lg |RM|$ 值分布比较弥散,整体落在脉冲星 $\lg |RM|$ 的范围之内.

6 总结

对RRAT的各观测参数进行统计分析,对其起源与演化问题非常重要.本文通过收集前人发布的RRAT数据,共找到182颗已发现的RRAT,更新了旋转射电暂现源数据库,并对旋转射电暂现源的空间位置、周期、周期导数、色散量、特征年龄、特征磁场、法拉第旋转量以及线偏振度等观测参数进行统计分析,并与脉冲星进行比较.发现RRAT的空间位置和脉冲星相近,周期和周期导数以及表面磁场的平均值比普通脉冲星略大,特征年龄和法拉第旋转量位于正常脉冲星范围,自转能损率、色散值以及距离比脉冲星要小,但是除了法拉第旋转量,其他所有以上观测参数的对数均服从正态分布.由于大多数RRAT的辐射表现为零星的单脉冲爆发,导致能被探测到的RRAT数量非常稀少.此外,RRAT的辐射较弱,受射电望远镜灵敏度的限制,人们无法像观测大多数脉冲星一样对其进行更加深入的单脉冲偏振观测以及计时观测,这导致将近有三分之一的RRAT无法获得其周期导数、特征年龄、特征磁场以及自转能损率等重要演化参数,而且也只有22颗RRAT给出了偏振观测.以上因素导致能用于参数统计分析的RRAT样本数量受到严重限制.尽管如此,本文的结果对于研

究RRAT的物理起源问题依然具有重要意义.

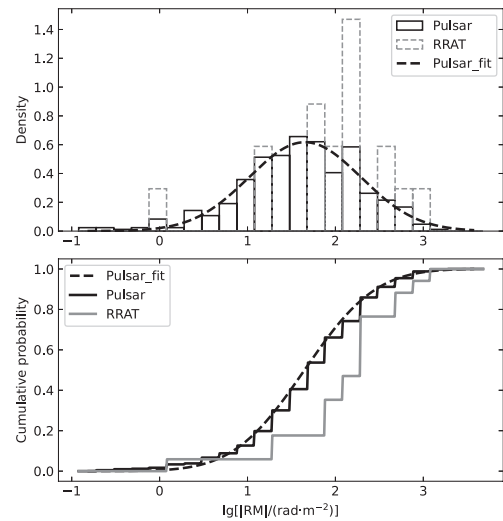


图 13 RRAT和脉冲星的法拉第旋转量的绝对值($|RM|$)对数的分布.上面子图为概率密度直方图,下面子图为累计直方图.黑色和灰色分别代表脉冲星和RRAT,虚线为对应的拟合曲线.

Fig. 13 Logarithmic distribution of the absolute value of the Faraday rotation ($|RM|$) of RRATs and pulsars. The upper panel is the probability density histogram, and the lower panel is the corresponding cumulative histogram. Black and grey represent the pulsars and RRATs respectively, and the dashed line is the corresponding fitting curve.

此外,本文的统计结果也将为FAST等大科学装置开展RRAT相关研究提供指导性意见.期待FAST和SKA (Square Kilometre Array)等更灵敏的射电望远镜能够探测到更多的RRAT,同时开展RRAT的辐射及自转特性研究,并对一些特殊的RRAT,比如4颗高磁场的RRAT J0736-6304、RRAT J1819-1458、RRAT J1840-0840和RRAT J1854+0306以及位于死亡线之下的RRAT J2311+67开展多波段观测,研究其与磁陀星之间的联系,进而使RRAT起源与演化的相关理论取得突破.

参考文献

- [1] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. Nature, 1968, 217: 709
- [2] Kramer M, Lyne A G, O'Brien J T, et al. Science, 2006, 312: 549
- [3] Lorimer D R, Bailes M, McLaughlin M A, et al. Science, 2007, 318: 777

- [4] McLaughlin M A, Lyne A G, Lorimer D R, et al. Nature, 2006, 439: 817
- [5] Deneva J S, Cordes J M, McLaughlin M A, et al. ApJ, 2009, 703: 2259
- [6] Burke-Spolaor S, Bailes M. MNRAS, 2010, 402: 855
- [7] Logvinenko S V, Tyul'bashev S A, Malofeev V M. BLPI, 2020, 47: 390

- [8] Wang N, Manchester R N, Johnston S. MNRAS, 2007, 377: 1383
- [9] Li X D. ApJ, 2006, 646: L139
- [10] Luo Q, Melrose D. MNRAS, 2007, 378: 1481
- [11] Yao J M, Manchester R N, Wang N. ApJ, 2017, 835: 29
- [12] 尹德江, 张立云. 天文学报, 2023, 64: 9
- [13] Yin D J, Zhang L Y. ChA&A, 2023, 47: 335
- [14] Lorimer D R, Kramer M. Handbook of Pulsar Astronomy. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2012: 59
- [15] Chen K, Ruderman M. ApJ, 1993, 402: 264
- [16] Zhang B, Harding A K, Muslimov A G. ApJ, 2000, 531: L135
- [17] Bezuiden M C, Barr E, Caleb M, et al. MNRAS, 2022, 512: 1483
- [18] Reynolds S P, Borkowski K J, Gaensler B M, et al. ApJ, 2006, 639: L71
- [19] Lyne A G, McLaughlin M A, Keane E F, et al. MNRAS, 2009, 400: 1439
- [20] Karako-Argaman C, Kaspi V M, Lynch R S, et al. ApJ, 2015, 809: 67
- [21] Cordes J M, Lazio T J W. arXiv: astro-ph/0207156
- [22] Knight H S, Bailes M, Manchester R N, et al. ApJ, 2006, 640: 941
- [23] Karastergiou A, Hotan A W, van Straten W, et al. MNRAS, 2009, 396: L95
- [24] Xie J, Wang J, Wang N, et al. ApJL, 2022, 940: L21
- [25] Caleb M, van Straten W, Keane E F, et al. MNRAS, 2019, 487: 1191
- [26] Zhou D J, Han J L, Xu J, et al. RAA, 2023, 23: 104001
- [27] Han J L, Manchester R N, van Straten W, et al. ApJS, 2018, 234: 11
- [28] Tyul'bashev S A, Tyul'bashev V S, Malofeev V M. A&A, 2018, 618: A70
- [29] Samodurov V A, Tyul'bashev S A, Toropov M O, et al. ARep, 2023, 67: 590
- [30] Logvinenko S V, Tyul'bashev S A, Malofeev V M. BLPI, 2020, 47: 390
- [31] Tyul'bashev V S, Tyul'bashev S A, Malofeev V M, et al. ARep, 2018, 62: 63
- [32] Chen J L, Wen Z G, Yuan J P, et al. ApJ, 2022, 934: 24
- [33] Tyul'bashev S A, Pervukhin D V, Kitaeva M A, et al. A&A, 2022, 664: A37
- [34] Han J L, Wang Chen, Wang P F, et al. RAA, 2021, 21: 107
- [35] Dong F A, Crowter K, Meyers B W, et al. MNRAS, 2023, 524: 5132
- [36] Good D C, Andersen B C, Chawla P, et al. ApJ, 2021, 922: 43

Statistical Study of the Physical Parameters of Rotating Radio Transients

WU Chen-bing^{1,2} LI Wei^{1,2} CAI Yan-qing^{1,2} LI Qing-ying^{1,2} YU Zhi-xiang^{1,2}
DANG Shi-jun^{1,2} SHANG Lun-hua^{1,2}

(1 School of Physics and Electronic Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025)
(2 Guizhou Provincial Key Laboratory of Radio Astronomy and Data Processing, Guiyang 550025)

ABSTRACT The discovery of rotating radio transients (RRATs) has been nearly 20 years, but their origin is still unclear. We have collected in total 182 RRATs, and the RRAT database has been updated. The statistical analysis of the observational parameters of RRATs, such as location, period, period first derivative, dispersion measure, distance, characteristic age, characteristic magnetic field, Faraday rotation, and linear polarization degree. It was found that except for Faraday rotation, the logarithms of all other observed parameters followed a normal distribution. Compared with pulsars, the spatial location of RRAT sources is similar to that of pulsars, and the average values of period, period derivative, and surface magnetic field are slightly larger than those of ordinary pulsars. The characteristic age and Faraday rotation are within the normal pulsar range, and the rotation energy loss rate, dispersion value, and distance are smaller than those of pulsars. These results are of great significance for studying the physical origin of RRATs.

Key words star: pulsar: general, pulsar: rotating radio transient (RRAT), methods: data analysis

附录

表 1 182 颗 RRAT 的参数
Table 1 The parameters of 182 RRATs

Number	Name	Other name	RA (hh, mm, ss.ss)	Dec (dd, mm, ss.ss)	GL	GB	DM (pc · cm ⁻³)	P /s	\dot{P} (10 ⁻¹⁵ s · s ⁻¹)	B_{surf} (10 ¹² Gs)	\dot{E} (10 ³³ erg · s ⁻¹)	τ_c /Myr	Burst Rate /h ⁻¹	Dis. /kpc	RM (rad · m ⁻²)	L/1	Ref.
1	J0305+4001		03: 05: 26 (32)	40: 01 (15)	149.01	-15.97	24 (2)							1.1865			28
2	J0249+52		02: 49	52: 46	140.3	-6.09	27.5					0.44		1.262			29
3	J1550+09		15: 50: 47	09: 43	19.3	44.35	21							1.85			30
4	J0319+1341	J0318+1341	03: 19: 30	13: 41 (20)	168.96	-35.63	12 (2)	1.974						0.2965			31
5	J1918-0449		19: 18: 36.07	-04: 49: 49.80	31.7	-8.23	116.1	2.47921						7.2716			32
6	J0034+27		00: 34: 57	24: 27	118.48	-34.94	16					0.017		1.2164			33
7	J1905+0849		19: 05: 03	08: 49	42.327	1.017	257.8	1.034				48		7.7036	493.9		34
8	J0012+5431		00: 12: 23.3 (1)	54: 31: 47 (3)	117.23	-7.91	131.3 (7)	3.02530071	1.3	2.006	0.185	36.896		5.4261			35
9	J0201+7005		02: 01: 41.344 (7)	70: 05: 18.11 (6)	128.89	8.03	21.029 (2)	1.349184471847 (9)	5.514 (1)	2.8	8.9	3.9	180	1.1718	-39	RRATalog	
10	J0209+5759		02: 09: 37.304 (16)	57: 59: 45.31 (18)	133.2	-3.3	55.3 (6)	1.0639060415 (1)	13.919	3.16	45.65	1.41	21.4 (5)	1.7429			36
11	J0054+66		00: 54	66: 00	123.19	3.13	14.554 (7)	1.3903				0.7		0.8767		RRATalog	
12	J0302+2252	J0301+20	03: 02: 31.990 (4)	22: 52: 12.1 (2)	158.44	-30.82	18.9922 (6)	1.207164839778 (2)	0.0825 (1)	0.3	0.2	232		1.0135		RRATalog	
13	J0054+69		00: 54: 28 (25)	69: 26 (2)	123.2	6.56	90.3 (2)					300		2.3464		RRATalog	
14	J0103+54		01: 03: 37 (20)	54: 02 (5)	124.74	-8.80	55.605 (4)	0.354304 (6)				390		2.0105		RRATalog	
15	J0332+79		03: 32: 45 (20)	79: 10 (5)	130.31	18.68	16.67 (2)	2.05621 (6)				30		1.0537		RRATalog	
16	J0410-31		04: 10: 39 (3.3)	-31: 07 (7)	230.59	-46.67	9.2 (3)	1.8785 (2)	0.88	1.259	0.524	33.88	107	0.4147	16	60	RRATalog
17	J0441-04		04: 41	-04: 18	200.95	-30.83	20							0.1646		RRATalog	
18	J0447-04		04: 47 (1)	-04: 35 (18)	202.07	-29.66	29.83 (4)	2.18819 (2)				103		0.6748		RRATalog	
19	J0452+1651		04: 52: 56 (90)	16: 51 (25)	183.27	-16.79	19 (3)							0.1581		28	
20	J0513-04		05: 13	-04: 18	205.23	-23.81	18.5							0.1543		RRATalog	
21	J0534+3407		05: 34: 30 (20)	34: 07 (15)	174.35	0.74	24.5 (1.5)							0.4034		28	
22	J0544+20	J0544-20	05: 44: 12 (02: 00)	20: 50 (8)	186.76	-4.5	56.9					4		1.283		RRATalog	
23	J0545-03		05: 45 (2)	-03: 10 (36)	208.09	-16.21	67.2 (4)	1.07393 (2)				77		2.0615		RRATalog	
24	J0550+09		05: 50: 28 (01: 5.4)	09: 51 (8)	197.06	-8.77	86.6	1.745				47		1.8043		RRATalog	
25	J0609+1635		06: 09: 18 (21)	16: 35 (30)	193.42	-1.48	85 (3)							1.6393		28	
26	J0614-03		06: 15	-03: 29	211.89	-9.69	17.9	0.136						0.1507		RRATalog	
27	J0621-55		06: 20: 42 (30)	-56: 05 (7)	264.80	-26.41	22							0.38		RRATalog	
28	J0625+1730		06: 25: 19 (90)	17: 30 (25)	194.43	2.36	58 (4)							1.2615		28	
29	J0627+16		06: 27: 13 (7)	16: 12 (2)	195.79	2.12	113	2.18				23		1.9323		RRATalog	
30	J0628+0909		06: 28: 36.183 (5)	09: 09: 13.9 (3)	202.19	-0.85	88.3 (2)	1.241421391299 (3)	0.5479 (2)	0.8	1.1	35.9	141	1.771	124	50	RRATalog
31	J0641+0744	J0640+0744	06: 41: 10	07: 44 (25)	204.882	1.25	52 (4)							1.2574		31	
32	J0653-06		06: 53	-06: 16	218.69	-2.51	83.7	0.79						2.1403		35	
33	J0723-2050		07: 23: 04.8 (18)	-20: 49: 51 (7)	234.99	-2.73	130	0.71154						3.2647		17	
34	J0736-6304	J0735-62	07: 36: 20.01 (27)	-63: 04: 16 (2)	274.88	-19.15	19.4	4.8628739612 (7)	151.9 (2)	27.5	5.2	0.5	39.65	0.104		20	RRATalog
35	J0741+17		-07: 41 (17)	-17: 03 (28)	202.768	18.438	44.3	1.73						1.2069		35	
36	J0744+55		07: 44: 45	55: 05	162.68	29.42	10.5					0.38		0.4014		29	
37	J0803+3410		08: 03: 05 (85)	34: 10 (15)	186.9	28.85	34 (2)							1.2988		28	

表1 续
Table 1 Continued

Number	Name	Other name	RA (hh: mm: ss.ss)	Dec (dd: mm: ss.ss)	GL	GB	DM (/pc · cm ⁻³)	P (/s)	\dot{P} (/10 ⁻¹⁵ s · s ⁻¹)	\dot{E} (/10 ³¹ erg · s ⁻¹)	τ_c (Myr)	Burst Rate (/h ⁻¹)	Dis. (/kpc)	RM (/rad · m ⁻²)	L/I (%)	Ref.
38	J0837-24		08: 37: 44 (31)	-24: 47 (7)	247.45	9.8	142.8 (5)				5	25			50	RRATalog
39	J0845-36		08: 45 (7)	-36	257.4	4.26	29 (2)	0.2123	0.129	0.1674	26.09	1.8	0.3291			RRATalog
40	J0847-4316		08: 47: 57.33 (5)	-43: 16: 56.8 (7)	263.44	0.16	292.5 (9)	5.977492737 (7)	119.84 (2)	27.1	2.2	0.8	6.547		20	RRATalog
41	J0854-5449		08: 54: 25.7255 (8)	54: 49: 28.782 (11)	162.8	39.4	18.837 (1)	1.233032602667 (5)	0.3122	0.63	61.65	21.5 (6)	1.4354	-8.8 (20)		36
42	J0912-3851		09: 12: 42.70 (2)	-38: 51: 03 (1)	263.16	6.58	71.5 (7)	1.326085076 (3)	3.59 (5)	2.4	4	6.7	32	0.3456		RRATalog
43	J0923-31		09: 23: 58 (50)	-31: 57 (15)	259.7	13	72 (20)				1.7					RRATalog
44	J0930-1854		09: 30: 35.27 (2)	-18: 54: 31.1 (18)	250.76	23.01	33						2.4768			17
45	J0941+1621		09: 41: 30	16: 21 (20)	216.58	44.87	24						1.9683			28
46	J0941-39		09: 41: 38 (46)	-39: 41 (15)	267.8	9.9	78.2 (2.7)	0.58677841838 (3)	4.4	1.585	2.089		0.3563	-78	40	RRATalog
47	J0943-5305		09: 43: 08	-53: 05: 17	276.84	-0.03	174	1.734					0.3724			17
48	J0957-06		09: 57 (2)	-06: 17 (36)	244.76	36.2	26.95 (2)	1.7237 (8)			180		2.4609			RRATalog
49	J1005+3015		10: 05: 30 (40)	30: 15 (15)	197.937	53.673	17.5 (1.5)						1.9902			28
50	J1010+15		10: 10 (31)	15: 51 (8)	221.26	50.98	42						25			RRATalog
51	J1014-48		10: 14: 18 (42)	-48: 49 (7)	278.14	6.33	87 (7)	1.5088 (2)			16		0.3792			RRATalog
52	J1048-5838		10: 48: 12.561 (14)	-58: 38: 19.02 (10)	287.47	0.48	70.7 (9)	1.23130477663 (4)	12.19375 (7)	3.9	25.8	1.6	1.0081		15	RRATalog
53	J1059-01		10: 59	-01: 02	254.53	50.96	18.7						1.8586			RRATalog
54	J1105+02		11: 05: 32 (2)	02: 28: 50.74 (30)	252.59	54.65	16.5 (4)	6.403055372	14.3	3.06	70.95		1.5796			35
55	J1111-55		11: 11 (7)	-55	288.79	5.09	235 (5)				0.4		2.443			RRATalog
56	J1126-27		11: 26 (2)	-27: 37 (36)	280.68	31.54	26.86 (7)	0.358161 (8)			180		0.4365			RRATalog
57	J1129-53		11: 29: 21 (36)	-53: 31 (15)	290.8	7.41	77 (2.5)	1.06288 (5)			36.2		1.4569	-19	30	RRATalog
58	J1130+09		11: 30: 55 (5)	09: 20: 48.55	252.24	63.96	21 (9)	4.796636974 (6)	2.9	3.75	26.44		3.3583			35
59	J1132+0921		11: 32	09: 21 (20)	252.66	64.16	22 (2)						7.5512			28
60	J1132+2515		11: 32: 50 (30)	25: 15 (15)	214.581	72.285	23 (3)	1.002					25			28
61	J1135-49		11: 35: 56 (42)	-49: 25 (7)	290.53	11.62	114 (20)				1.3		2.1294			RRATalog
62	J1152-6056		11: 52: 37.44 (13)	-60: 56: 22 (1)	295.85	1.12	381	2.449 (6)					6.43			17
63	J1153-21		11: 53 (2)	-21: 18 (36)	285.19	39.55	34.8 (1)	2.34348 (5)			150		2.332			RRATalog
64	J1216-50		12: 16: 20 (44)	-50: 27 (7)	297.23	12.03	110 (20)	6.355 (9)			13		2.301			RRATalog
65	J1226-3223		12: 26: 46.628 (40)	-32: 23: 01 (1)	296.91	30.2	36.7	6.1930040852 (5)	7.05 (1)	6.7	13.9	40.9	2.174	-63	30	RRATalog
66	J1252+53		12: 52 (13)	53: 42 (17)	122.75	63.43	20.7 (3)	0.221035829 (8)			0.09		3.191			RRATalog
67	J1307-67	J1308-67	13: 07: 41 (01: 12)	-67: 03 (7)	304.52	-4.24	44 (2)	3.6512 (8)			11		1.0933			RRATalog
68	J1311-59		13: 11 (7)	-59	305.45	3.78	152 (5)				0.3		3.485			RRATalog
69	J1317-5759		13: 17: 46.29 (3)	-57: 59: 30.5 (3)	306.43	4.7	145.3 (3)	2.6421985132 (5)	12.56 (3)	5.8	3.3	4.5	3.765	174	35	RRATalog
70	J1329+1344	1329+1349	13: 29	13: 44 (20)	338.01	73.99	12 (2)						1.0869			31
71	J1332-03		13: 32 (2)	-03: 26 (36)	322.25	57.91	27.1 (2)	1.1064 (5)			51		25			RRATalog
72	J1336-20		13: 36	-20: 34	316.82	41.1	19.3	0.184					1.4169			RRATalog
73	J1336+3346		13: 36	33: 46 (15)	70.319	78.337	8.5 (1)	3.013					0.7192			31
74	J1346+0622		13: 46	06: 22 (25)	337.38	65.52	8 (1)						0.6261			28

表1 续
Table 1 Continued

Number	Name	Other name	RA (hh: mm: ss.ss)	Dec (dd: mm: ss.ss)	GL	GB	DM (pc · cm ⁻³)	P /s	\dot{P} /(10 ⁻¹⁵ s · s ⁻¹)	B_{surf} (10 ¹² Gs)	\dot{E} (10 ³⁸ erg · s ⁻¹)	τ_c /Myr	Burst Rate /h ⁻¹	Dis. /kpc	RM (rad · m ⁻²)	L/1 (%)	Ref.
75	J1354+24		13: 54	24: 54	27.43	75.78	20							3.7346			RRATablog
76	J1400+2127		14: 00: 18 (30)	21: 27 (15)	16.752	73.332	10.5 (1)							0.908			28
77	J1404+1210		14: 04: 49 (38)	12: 10 (20)	355.49	67.2	17 (1)	2.6505						1.8194			28
78	J1404-58		14: 04 (7)	-58	312.45	3.52	229 (5)						1.1	5.7439			RRATablog
79	J1424-56	J1423-56	14: 24: 23 (50)	-56: 40 (7)	315.48	3.91	32.9 (1.1)	1.427						0.9493	-1	31	RRATablog
80	J1432+09		14: 32: 30	09: 08	0.68	60.11	14						0.017	1.226			33
81	J1433+00		14: 33: 30 (01: 53)	00: 28 (8)	349.75	53.79	23.5						2	2.9929			RRATablog
82	J1439+76		14: 39 (2)	76: 55 (36)	115.4	38.6	22.29 (2)	0.947903 (2)					450	2.0479			RRATablog
83	J1444-6026		14: 44: 06.02 (7)	-60: 26: 09.4 (4)	316.4	-0.54	145.3 (1.4)	4.7585755679 (2)	18.542 (8)	9.5	0.7	4.1	0.78	3.5138			RRATablog
84	J1502+2813		15: 02: 09 (40)	28: 13 (15)	42.78	61.127	14 (1.5)	3.784						1.2887			28
85	J1513-5946		15: 13: 44.78 (1)	-59: 46: 31.9 (7)	319.97	-1.7	171.7 (9)	1.046117156733 (8)	8.5284 (4)	3	26.4	1.9	20	3.7575	104	35	RRATablog
86	J1534-46		15: 34: 08 (42)	-46: 14 (15)	330.01	7.91	64.4 (7.8)	0.364835 (9)						2.0356			RRATablog
87	J1538+2345		15: 38: 06.07 (2)	23: 45: 04 (2)	37.32	52.39	14.909 (1)	3.44938495332 (9)	6.89 (1)	4.9	0.7	7.9	129	1.3124	11.5		RRATablog
88	J1541-42		15: 41: 44 (38)	-42: 18 (7)	333.49	10.23	60 (10)						7	2.1132			RRATablog
89	J1541+47		15: 41: 05.54	47: 03: 03.45	75.497	51.394	19.4 (7)	0.27770692893 (3)	0.2102 (9)	0.244	38.77	20.87		2.0334			35
90	J1549-57		15: 49: 05 (52)	-57: 21 (7)	325.13	-2.35	17.7 (3.5)	0.7375 (3)					73	0.704			RRATablog
91	J0121+53		01: 21 (11)	53: 29 (16)	127.38	-9.13	91.38 (3)	2.7247846 (4)					2.4	2.6433			RRATablog
92	J1554+18		15: 54: 17 (01: 58)	18: 04 (8)	30.69	47.07	24						11	2.753			RRATablog
93	J1554-5209		15: 54: 27.18 (2)	-52: 09: 39.3 (4)	329.01	1.19	130.8 (3)	0.1252295584025 (7)	2.29442 (5)	0.5	4614.8	0.9	50.3	3.079	-139	70	RRATablog
94	J1555+0108	J1556+0110	15: 55: 58 (17)	01: 08 (25)	10.44	38.73	18.5 (1.5)							1.2534			28
95	J1603+18		16: 03: 34 (01: 58)	18: 51 (8)	32.85	45.28	29.7	0.503					4	25			RRATablog
96	J1610-17		16: 10: 11 (57)	-17: 50 (15)	355.61	24.11	52.5 (3)						13.6	3.7683			RRATablog
97	J1611-01		16: 11 (2)	-01: 28 (36)	10.45	34.16	27.21 (7)	1.29687 (2)					51	2.0152			RRATablog
98	J1623-0841		16: 23: 42.6827 (97)	-08: 41: 36.6 (5)	5.77	27.37	59.79 (2)	0.5030150056 (1)	1.9556 (7)	1	60.7	4.1	35.77	4.65			RRATablog
99	J1647-3607		16: 47: 46.51 (2)	-36: 07: 04 (1)	347.08	5.77	224 (1)	0.21231640921 (5)	0.129 (2)	0.2	53.2	26.1	436.4	15.92			RRATablog
100	J1649-46		16: 49 (7)	-46	339.65	-0.76	394 (10)						0.3	0.4434			RRATablog
101	J1652-4406		16: 52: 59.5 (2)	-44: 06: 05 (4)	341.56	-0.09	786 (10)	7.707183007 (4)	9.5 (2)	8.7	0.1	12.9	0.7	5.108			RRATablog
102	J1654-2335	J1653-2330	16: 54: 03 (31)	-23: 35 (7)	357.86	12.55	74.5 (2.5)	0.54535972 (3)	13.51	1.621	329	0.63	40.9	4.0698			RRATablog
103	J1703-38		17: 03: 26 (37)	-38: 12 (7)	347.41	2.04	375 (12)	6.443 (1)					3.2	14.19			RRATablog
104	J1705-04		17: 05 (2)	-04: 41 (36)	15.71	21.1	42.951 (9)	0.23748 (2)					26	0.2098			RRATablog
105	J1707-4417	J1704-44	17: 07: 41.41 (3)	-44: 17.19 (1)	343.04	-2.28	380 (10)	5.763777003 (4)	11.65 (2)	8.3	0.2	7.8	8.5	14.062	-655	50	RRATablog
106	J1709-43		17: 09: 47 (39)	-43: 54 (7)	343.57	-2.36	228 (20)						7	4.5987			RRATablog
107	J1717+03		17: 17: 56 (01: 54)	03: 11 (8)	24.78	22.20	25.6	3.901					8	1.2379			RRATablog
108	J1720+00		17: 20: 55 (01: 53)	00: 40 (8)	22.79	20.35	46.2	3.357					33	2.555			RRATablog
109	J1724-35		17: 24: 43 (36)	-35: 49 (7)	351.83	-0.01	554.9 (9.9)	1.42199 (2)					3.4	4.33			RRATablog
110	J1727-29		17: 27: 19 (33)	-29: 59 (7)	356.97	2.80	93 (10)						0.9	2.613			RRATablog
111	J1732+2700		17: 32: 24 (41)	27: 00 (15)	50.57	28.36	36.5 (1.5)							3.9979			28

表1 续
Table 1 Continued

Number	Name	Other name	RA (hh: mm: ss.ss)	Dec (dd: mm: ss.ss)	GL	GB	DM (pc · cm ⁻³)	P /s	\dot{P} /(10 ⁻¹⁵ s · s ⁻¹)	B_{surf} /(10 ¹² Gs)	\dot{E} /(10 ³¹ erg · s ⁻¹)	τ_c /Myr	Burst Rate /h ⁻¹	Dis. /kpc	RM /(rad · m ⁻²)	L/1 /%	Ref.
112	J1739-2521		17: 39: 32.629 (54)	-25: 21: 56 (15)	2.33	3.03	186.4	1.8184611928 (2)	0.24 (2)	0.7	0.2	120.1	22.64	4.412			RRATablog
113	J1753-12		17: 52: 53 (58)	-12: 59 (15)	14.61	6.7	73.2 (5.2)	0.405454 (1)					40.9	1.123			RRATablog
114	J1753-38		17: 53 (1)	-38: 49 (7)	352.28	-6.37	168.4 (1.3)	0.666804					26.3	8.9166	123	30	RRATablog
115	J1754-3014		17: 54: 30.181 (40)	-30: 15: 03 (5)	359.86	-2.33	89.7 (7)	1.3204904144 (3)	4.43 (2)	2.4	7.6	4.7	0.6	2.52			RRATablog
116	J1807-2557		18: 07: 13.66 (1)	-25: 57: 20 (5)	4.99	-2.65	385 (10)	2.76419486975 (4)	4.994 (2)	3.8	0.9	8.8	6.2	18.5789			RRATablog
117	J1819-1458		18: 19: 34.16 (1)	-14: 58: 03.57 (1)	16.02	0.08	196 (4)	4.2632901504 (1)	562.717 (4)	49.6	28.7	0.1	17.6	3.301	323	55	RRATablog
118	J1825-33		18: 26: 02 (50)	-33: 21 (15)	0.31	-9.70	43.2 (2)	1.2712 (2)					14.4	1.2386			RRATablog
119	J1826-1419		18: 26: 42.391 (4)	-14: 19: 21.6 (3)	17.4	-1.14	160 (1)	0.770620171033 (7)	8.7841 (2)	2.6	75.8	1.4	1.06	3.2423			RRATablog
120	J1838+50		18: 38 (8)	50: 51 (15)	79.82	22.74	21.81 (1)	2.577273412 (5)					3.9	1.704			RRATablog
121	J1839-0141		18: 39: 06.9848 (85)	-01: 41: 56 (2)	30.01	1.96	293.2 (6)	0.93326558076 (2)	5.944 (1)	2.4	28.9	2.5	0.61	6.0662			RRATablog
122	J1840-0840		18: 40: 51.9 (4)	-08: 40: 29 (15)	24.01	-1.62	299	5.3003760847 (20)	23.7 (12)	11.35	0.625	3.55		5.8276			17
123	J1840-1419		18: 40: 33.04 (1)	-14: 19: 06.5 (9)	18.94	-4.12	19.4 (1.4)	6.5975625223 (1)	6.353 (1)	6.6	0.1	16.5	46	0.721	60	35	RRATablog
124	J1841-0448		18: 41: 10 (20)	-04: 48 (25)	27.49	0.09	29 (3)							0.9934			28
125	1843-0757		18: 43: 33.06 (2)	-07: 57: 33 (2)	24.95	-1.88	254	2.03194008516 (9)	4.13 (3)	2.93	1.9445	7.8		5.0085			17
126	J1843+01		18: 43	01	32.86	2.33	247.8 (2.4)	1.26702 (4)						5.8594			RRATablog
127	J1846-0257		18: 46: 15.49 (4)	-02: 57: 36 (1.8)	29.71	-0.2	237 (7)	4.4767225398 (1)	160.587 (3)	27.1	7.1	0.4	1.1	4.003			RRATablog
128	J1848+1516		18: 48: 56.13 (2)	15: 16: 44.1 (4)	46.33	7.44	77.436 (9)	2.23376977466 (5)	1.6813 (8)	2	0.6	21.1		3.544			RRATablog
129	1848-1243		18: 48: 18.026 (14)	-12: 43: 30 (1)	21.22	-5.08	91.96 (2)	0.4143833544 (2)	0.4405 (8)	0.4	24.5	14.9	1.25	3.149			RRATablog
130	J1850+15		18: 50: 09 (58)	15: 32 (15)	46.69	7.29	24.7 (8.7)	1.383965 (3)						1.2247			RRATablog
131	J1853+04		18: 53	04	36.67	1.48	549.3 (1.3)	1.32065 (4)						14.8192			RRATablog
132	J1854+0306		18: 54: 02.98 (3)	03: 06: 14 (1)	35.99	0.83	192.4 (5.2)	4.5578200962 (1)	145.125 (6)	26	6.1	0.5	84	4.4938			30 RRATablog
133	J1854-1557		18: 54: 53.6 (1)	-15: 57: 47 (14)	19.02	-7.95	150 (17)	3.4531211813 (7)	4.52 (4)	4	0.4	12.1	25	10.8962	-66	50	RRATablog
134	J1856+09		18: 56	09	41.47	3.09	193.4 (6)	2.1707 (1)						9.8474			RRATablog
135	J1859+07		18: 59	07	40.02	1.51	303.1 (2.2)							10.2723			RRATablog
136	J1901+11		19: 01	11	43.81	2.9	268.9 (8)	4.0914 (1)						13.92			RRATablog
137	J1901+0254		19: 01: 15.67 (7)	02: 54: 41 (5)	36.64	-0.86	181	1.2996934495 (3)	0.46 (11)	0.78	0.8276	44.7		4.2549			17
138	J1905+0414		19: 05	04: 14	38.25	-1.08	383 (1)							9.085			RRATablog
139	J0139+3336 J0139+3310		01: 39: 57.23 (4)	33: 36: 59.7 (9)	134.38	-28.17	21.23 (1)	1.2479609557 (1)	2.064 (8)	1.6	4.2	9.6		1.4723			RRATablog
140	J1909+0641		19: 09: 29.052 (4)	06: 41: 25.8 (2)	40.94	-0.94	36.7 (2)	0.741701952452 (6)	3.2239 (7)	1.6	31.2	3.6	67	1.3253			26 RRATablog
141	J1911+00		19: 11: 48 (29)	00: 37 (7)	35.81	-4.25	100 (3)	6.94 (1)					0.31	4.0475			RRATablog
142	J1913+1330		19: 13: 17.97 (1)	13: 30: 32.78 (4)	47.42	1.38	175.64 (6)	0.02339138665 (2)	8.6776 (2)	2.9	43.5	1.7	4.7	6.179	945	40	RRATablog
143	J1915-11		19: 15 (2)	-11: 30 (36)	25.24	-10.39	91.06 (8)	2.177 (2)					26	5.4929			RRATablog
144	J1917+1723		19: 17: 30	17: 23 (20)	51.32	2.28	38 (3)							1.6643			28
145	J0156+04		01: 56: 01 (01: 54)	04: 02 (8)	151.97	-55.15	27.5						2	25			RRATablog
146	J1919+1745		19: 19: 43.342 (4)	17: 45: 03.79 (8)	51.9	1.99	142.3 (2)	2.081343459724 (9)	1.705 (4)	1.9	0.7	19.4	320	4.0944			RRATablog
147	J1925-16		19: 25: 06 (29)	-16: 01 (7)	22.13	-14.54	88 (20)	3.8858 (2)					6.5	7.9387			RRATablog
148	J1928+15		19: 28: 20 (7)	15: 13 (2)	50.64	-1.03	242	4.403					4	5.7462			RRATablog
149	J1930+0104		19: 30: 30	01: 04 (25)	38.37	-8.19	42 (3)							1.4836			28

表1 续
Table 1 Continued

Number	Name	Other name	RA (hh: mm: ss.ss)	Dec (dd: mm: ss.ss)	GL	GB	DM (pc: cm ⁻³)	P /s	\dot{P} /(10 ⁻¹⁵ s ⁻¹ s ⁻¹) / (10 ¹² Gs)	\dot{E} /(10 ³¹ erg s ⁻¹) / Myr	τ_c /Myr	Burst Rate /h ⁻¹	Dis. /kpc	RM /(rad · m ⁻²) (%)	L/1	Ref.
150	J1931+42		19: 31 (7)	42: 30 (5)	75.15	11.27	50.9 (2)				8		4.2342			RRATablog
151	J1944-10		19: 44 (2)	-10: 17 (36)	29.53	-16.29	31.01 (3)	0.409135 (1)			180		1.282			RRATablog
152	J1946+24		19: 46 (7)	23: 58 (2)	60.31	-0.38	96	4.729			54		4.2978			RRATablog
153	J1952+30		19: 52	30	66.18	1.53	188.8 (6)	1.6656 (1)					7.4988			RRATablog
154	J1956-28		19: 56 (2)	-27: 53 (36)	13.22	-25.59	45.69 (1)	0.2600144 (6)			120		3.7288			RRATablog
155	J1958+30		19: 58	30	66.86	0.42	199.3 (4)	1.09853 (2)					7.2856			RRATablog
156	J2000+59		20: 00	29	66.23	-0.48	132.3 (7)	3.0737 (1)					6.7323			RRATablog
157	J2002+13		20: 02: 07	13: 03	52.81	-9.21	5				0.026		0.3472		33	33
158	J2007+20		20: 07 (2)	20: 21 (36)	59.72	-6.41	67 (4)	4.634 (7)			77		3.8065			RRATablog
159	J2008+3758		20: 07: 58.7 (2)	37: 58: 13 (1)	74.71	2.898	143 (1)	4.352302968	7.2	5.665	9.58		5.9231		35	35
160	J2033+0042		20: 33: 31.12 (2)	00: 42: 24.1 (9)	45.88	-22.2	37.8 (1)	5.01340011141 (8)	9.693 (2)	7.1	0.3	8.2	2.9291	-71.2		RRATablog
161	J2047+13	J2047+12	20: 47: 45	12: 59	58.96	-18.6	36						2.9518		30	30
162	J2052+1308		20: 52: 21 (40)	13: 08 (20)	59.77	-19.43	42 (3)						3.8717		28	28
163	J2105+1917		21: 05: 20 (20)	19: 21 (20)	66.988	-18.18	33 (3)						2.8		28	28
164	J2105+6223		21: 05: 12.93 (2)	62: 23: 05.5 (1)	99.79	10.18	50.75 (8)	2.30487883766 (4)	5.219 (6)	3.5	1.7	31	2.7233			RRATablog
165	J2107+2606		21: 07: 30	26: 06 (20)	72.75	-14.27	10.5 (2)						0.7193		28	28
166	J2108+4516		21: 08 (7)	45: 16 (4)	87.29	-1.58	82.4 (3)	0.57722824 (7)	4.36909	1.61	89.74	2.09	3.5674		36	36
167	J2113+73		21: 13 (7)	73: 37 (21)	109.02	16.983	42.4						2.625		35	35
168	J2136+3032		21: 35	30: 32 (15)	80.37	-15.67	63 (2)						7.0118		28	28
169	J2138+69		21: 38 (14)	69: 50 (16)	107.6	12.95	46.6	0.22					2.485		35	35
170	J2146+2148		21: 46	21: 48 (20)	75.75	-23.64	43 (3)						5.0904		28	28
171	J2202+2147		22: 02: 21 (21)	21: 47 (20)	78.789	-26.252	17 (2)						1.2978		28	28
172	J2205+2244		22: 05: 30	22: 44 (20)	80.1	-26.01	22 (2)						1.7821		28	28
173	J2210+2118		22: 10: 07 (90)	21: 18 (20)	79.96	-27.79	45 (3)						25		28	28
174	J2215+4524		22: 15: 46.57 (7)	45: 24: 44 (2)	96.391	-9.287	18.5 (4)	2.7230498235 (3)	5.6 (2)	3.94	1.095	7.71	1.1313		35	35
175	J2221+51		22: 21 (13)	51: 32 (30)	117.434	20.317	39						2.486		35	35
176	J2225+35		22: 24: 48	35: 30	92.11	-18.45	51.8	0.942					4.9783			RRATablog
177	J2227+3031		22: 27	30: 31 (15)	89.5	-22.82	19 (2)						1.36		31	31
178	J2237+2828		22: 37: 29.41 (4)	28: 28: 40.8 (5)	90.342	-25.787	38.1 (4)	1.0773950914 (7)	0.9 (3)	0.987	2.843	19.27	3.9978		35	35
179	J2310+6706	J2311+67	23: 10: 42 (3)	67: 06: 52.1 (10)	113.35	6.14	97.7 (1)	1.944788973 (1)	0.076 (4)	0.4	0	405.7	60	2.6652	-16	RRATablog
180	J2316+75		23: 15 (17)	75: 44 (21)	116.977	13.989	53.4						2.441		35	35
181	J2325-0530		23: 25: 15.3 (1)	-05: 30: 39 (4)	75.58	-60.2	14.966 (7)	0.868735115026 (9)	1.029 (2)	1	6.2	13.4	1.495			RRATablog
182	J2355+1523		23: 55: 48.62 (8)	15: 23: 18 (2)	103.664	-45.392	26 (1)	1.09439626467 (5)	0.41 (2)	0.677	1.236	42.31	3.4433		35	35

RRATablog: <https://rratablog.github.io/rratablog/>