

毫秒脉冲星 40 年回望:中子星磁场的奥秘

张承民^{1,2,3} 王德华⁴ 周云刚⁴

(1. 中国科学院国家天文台 100101; 2. 中国科学院大学物理科学学院 100049; 3. 中国科学院 FAST 重点实验室 100101; 4. 贵州师范大学物理与电子科学学院 550025)

自 1967 年乔瑟琳·贝尔首次发现脉冲星(转动中子星)以来^[1], 历经半个多世纪的努力, 天文学家探测到脉冲星的数目超过 4000 颗; 其中我国自主建设的世界上最大最灵敏的 500 米口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope: FAST), 已经观测到 900 多颗新的脉冲星; 由于中子星的极端物质状态, 如超高的密度/引力场/磁场/压力/温度, 使得脉冲星已经成为现代物理学的天然实验室, 其观测现象涵盖多波段/多能段, 具有多信使(电磁波、引力波、中微子、宇宙线)的全方位物理特性的展示。目前发现的脉冲星种类多达十余种, 其磁场、自转、质量、辐射机制等表现出多样化的特征, 其起源与演化依然存在诸多的谜团^[2]。脉冲星的类型丰富多彩, 包括常规单星脉冲星、双

星脉冲星、吸积脉冲星、遗迹脉冲星、高能脉冲星、磁星、转动致密星体 CCO、间歇和暂现脉冲星、毫秒脉冲星等^[3]。同时, 脉冲星的精准计时, 使之成为验证爱因斯坦广义相对论和引力波的利器^[4]。多数脉冲星在射电波段被探测到, 但在其他高能段也发现了几百颗, 如伽马射线脉冲星, 以及存在于双星吸积系统的 X 射线中子星^[5]。

毫秒脉冲星是一类高速旋转的中子星, 其自转周期在 1.4~10 毫秒、其周期变化率明显低于常规脉冲星约三个量级, 被称为宇宙最精准的时钟^[5]。MSP 的磁场均值在 $\sim 10^{8.5}$ 高斯, 其形成与演化历史与双星系统中子星的性质高度成协^[6]。从脉冲星磁场与自转周期图中看出(如图 1), 大部分常规脉冲星的自转周期在 0.5 秒左右、其磁场在 $\sim 10^{12.5}$ 高斯左右

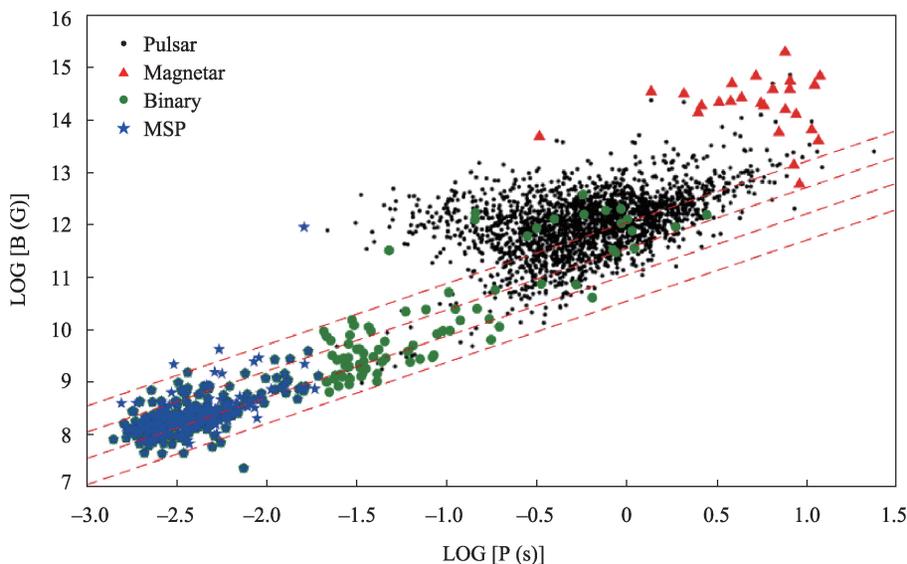


图1 脉冲星磁场—周期图, 其中常规脉冲星(Pulsar 圆点)、毫秒脉冲星(MSP 星号)、双星系统脉冲星(Binary 大的圆点)、以及磁星(Magnetar 三角)的分布明显不同。斜线是脉冲星的加速线, 从上到下分别代表吸积率为爱丁顿极限吸积率到万分之一爱丁顿吸积率

分布;磁星的周期与磁场分别在几秒与 $\sim 10^{14}$ 高斯处集中。显而易见,毫秒脉冲星、常规脉冲星、磁星,这些是三种不同类型的源,其磁场与周期的分布明显不同(见图1-2)。目前,天文学家已经观测到600多颗各种类型的毫秒脉冲星,其中多数处于双星系统,这暗示了它们的双星起源。相对于经历超新星爆发起源的正常脉冲星,那么MSP的磁场为什么如此之低,它们是如何形成的?我们将在接下来的章节介绍。

1. 毫秒脉冲星的发现与证认过程

1982年夏天,美国加州大学伯克利分校的天文学家在贝克(Backer)教授领导下进行脉冲星巡天观测,他们使用当时世界上最大最灵敏的射电设备,就是坐落在美国波多黎各岛的阿雷西博305米口径的射电望远镜,它曾经在1974年发现了第一套双中子星的脉冲星系统PSR B1913+16^[7],依此普林斯顿大学的天文学家泰勒(Taylor)与赫尔斯(Hulse)首次间接验证引力波辐射,并获得1993年的诺贝尔物理学奖。一位来自印度的研究生,名字叫史里尼瓦斯·库尔卡尼(Shrinivas R Kulkarni),正在加州理工学院攻读博士学位,他幸运地参加了脉冲星的数据分析。无意中,他注意到在狐狸星座有一颗快速旋转的脉冲星候选体,编号PSR B1937+21,转动周期

仅仅为1.558毫秒,这么快的脉冲星在1982年以前从来没有记录过,这让天文学家非常惊奇^[8]。那时,如此快速的毫秒脉冲星MSP的存在,既没有理论家预言,也不知道其形成对应的天体物理事件。PSR B1937+21的周期观测后,由于当时没有其转动能量损失率的观测,这引发了关于此类脉冲星起源和演化问题的广泛争论,学术界一片哗然。一般来说,转动快速的脉冲星是刚刚诞生的中子星,然而天文学家注意到,这个源的附近没有明显的超新星遗迹记录。第二年,天文学家进一步跟踪观测给出这颗MSP的周期变化率^[9],结果令人大跌眼镜,异常的微小,对比常规脉冲星这个值下降了4个数量级,由此推导出这个MSP的磁场只有 $\sim 10^8$ 高斯,也低了4个数量级!转动如此之快,而且磁场如此之低,这一切是如何造成的?宇宙之惊奇再次震撼了天文学家。

2. 毫秒脉冲星的形成与演化

20世纪80年代,天文学家已知中子星磁场介于百亿高斯到万亿高斯,双中子星系统的脉冲星PSR B1913+16的磁场比较低,大约 10^{10} 高斯,比正常脉冲星磁场低了两个数量级,于是有人猜想,MSP的磁场是否也是在双星系统的演化过程中衰减了?自转周期越小,那么磁场越小?即中子星自

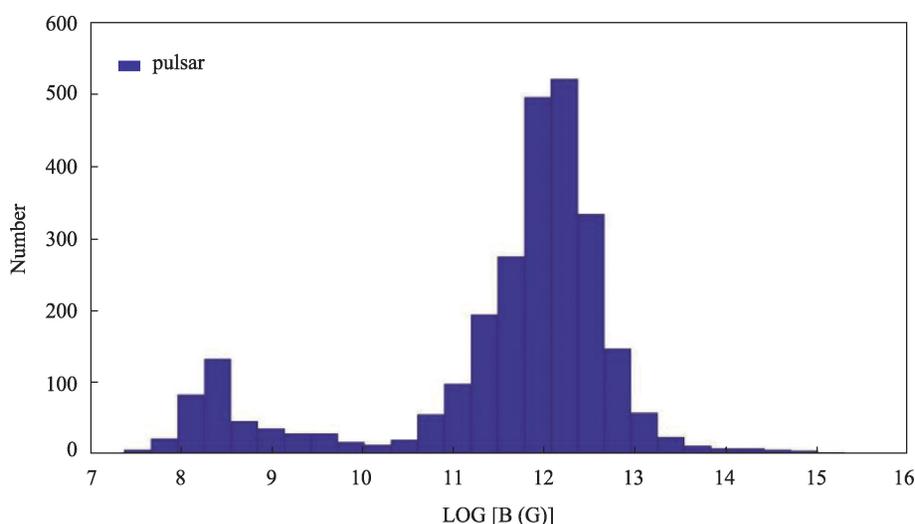


图2 脉冲星磁场分布的直方图,可以看到双峰分布,左边峰是毫秒脉冲星而右边峰是常规脉冲星



图3 毫秒脉冲星发现者之一,美国加州理工学院教授史里尼瓦斯·库尔卡尼 (Shrinivas R Kulkarni,前排左四)。他获得2024年邵逸夫天文学奖,以表彰他对毫秒脉冲星、伽马射线暴、超新星,以及其他瞬变天体的开创性发现。2019年他到中国科学院国家天文台FAST脉冲星团队来指导工作

旋在双星系统加速的同时,其磁场也相应地减少了? 如此说来,MSP不是年轻的脉冲星,而是一颗老年脉冲星。果然不出所料,周期变化率测量给出PSR B1937+21的特征年龄大约在宇宙学年龄,这让天文学家惊奇不已。到了20世纪90年代,而且还有特征年龄超过哈勃年龄,当然,MSP的真实年龄不会超过宇宙学年龄。天文学家陆续观测到许多MSP,它们多数有伴星,而且质量并不大,大约是太阳质量的10%。

阿雷西博望远镜发现的第一个毫秒脉冲星

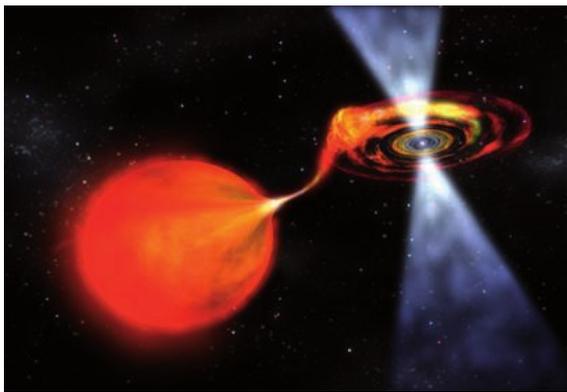


图4 处于低质量双星系统中吸积加速的毫秒脉冲星示意图

——PSR B1937+21,自转周期为1.56 ms,其磁场比常规脉冲星(蟹状星云脉冲星)低了4个数量级^[8]。面对MSP给脉冲星理论带来的危机,天文学家与天体物理学家重新思考中子星在双星系统的角色。MSP是一颗被吸积的伴星物质加速到毫秒周期的脉冲星^[10],其起源与演化的图像逐步清晰起来,其演化图景如下。

现在的理论研究给出,中子星在双星系统当中的演化图景是这样的。首先,有1~2个大质量恒星和一个大质量恒星处在双星系里面,他们的距离不能太远,也就是像太阳与地球这样;大质量恒星的寿命比较短,大概经历个几千万年就开始演化了,通过超新星爆发塌缩演化成一个中子星,类似于蟹状星云脉冲星,其自转周期演化到几秒但磁场不变,然而旁边那个伴星寿命大约是百亿年,进入后主序阶段,其物质溢出进入中子星的吸积盘,由于轨道角动量转移到中子星,使得中子星自转加快^[10]。一般来说,吸积0.1~0.2太阳质量,就可以将中子星加速到毫秒周期。磁场也是吸积造成的,在演化早期,中子星磁场在 $\sim 10^{12}$ 高斯,磁球半径大约1 000 km,轨

道周期约几秒量级。当中子星演化到晚期的时候,中子星磁场极冠的面积接近中子星的面积,若再增加质量,磁场极冠将再不增加了,也就出现了磁场饱和,大约是 10^8 高斯^[11]。这就是为什么大部分MSP的磁场集中在 $\sim 10^8$ 高斯,而低于 10^7 高斯的MSP一个也没有。

例如,位于高质量X射线双星中的中子星大约从伴星吸积了1/1000太阳质量,其磁场衰减较小,保持在 $10^{12}\sim 10^{13}$ 高斯;但是,对于处在低质量X射线双星中的中子星,吸积质量为0.1~0.5太阳质量,其磁场会衰减到 $10^8\sim 10^9$ 高斯^[12],同时其自转周期可被加速到毫秒量级,形成毫秒脉冲星。MSP形成以后,其磁场不再衰减,自转周期变化不大,这是因为其低磁场造成的制动损耗远远小于正常脉冲星。

那么,毫秒脉冲星与双星系吸积加速相关的证据是否观测到?答案是肯定的。1998年,天文学家发现了处于低质量X双星系统的2.5毫秒脉冲星SAX J1808.4-3658,这是射电MSP的前身星。2003年,天文学家发现了两个中子星的双脉冲星系统PSR 0737-3039AB^[14],其中一颗是被加速的中子星,另一颗是正常脉冲星,这符合理论预期。2009年,天文学家发现X射线与射电辐射转换毫秒脉冲星PSR B1845-19^[15],这是一个刚刚结束吸积状态,正在进入射电辐射的毫秒脉冲星。

3. 结语

常规脉冲星一般分布在银河系旋臂,并与年轻的超新星遗迹相关联,而毫秒脉冲星分布在银河系核心球附近,属于古老的恒星区,还有部分处于球状星团。毫秒脉冲星呈现多样化的观测性质,包括300多颗伽马射线毫秒脉冲星、具有射电掩食现象的蜘蛛毫秒脉冲星,暗示其正在蒸发伴星。由于毫秒脉冲星自转周期的高度稳定性,天文学家设想使用该类源作为引力波探测的载体。低质量X射线双星中,天文学家发现了各种类型的X射线准周期震荡(QPO),如kHz QPO现象,以及I-X射线暴。总之,毫秒脉冲星仍然存在大量谜团有待于破解,

这需借助空间与地面高精度望远镜的长期观测。

* 基金项目:国家自然科学基金天文联合基金项目(U1938117);国家自然科学基金项目(12163001,12463007);贵州师范大学学术新苗基金项目(黔师新苗[2022]05)

参考文献

- [1] Hewish, A., Bell, S. J., Pilkington, J. D. H., Scott, P. F., Collins, R. A. (1968) Observation of Rapidly Pulsating Radio Source. *Nature*, 217, 709-713.
- [2] Lorimer, D. R., Kramer, M. (2012) *Handbook of pulsar astronomy*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [3] 张承民,崔翔翰,王德华,杨佚沿,张见微,等.脉冲星发现55年:中国天眼展望[J],2022,40(24):72-77.
- [4] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. (2017) Search for gravitation waves from a long-lived remnant of the binary neutron star merger GW 170817. *The Astrophysical Journal*, 857, 160-179.
- [5] Manchester, R. N. (2017) Millisecond Pulsars, their Evolution and Applications. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 38, 18pp.
- [6] Bhattacharya, D., van den Heuvel, E. P. J. (1991) Formation and evolution of binary and millisecond radio pulsars. *Physics Reports*, 203, 1-124.
- [7] Hulse, R. A., Taylor, J. H. (1975) Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophysical Journal*, 195, L51-L53.
- [8] Backer, D. C., Kulkarni, S. R., Heiles, C., Davis, M. M., Goss, W. M. (1982) A millisecond Pulsar. *Nature*, 300, 615-618.
- [9] Kulkarni, S. R. (1983) Discovery of millisecond pulsar. *AIP Conference Proceeding*, 101, 118-125.
- [10] Alpar, M. A., Cheng, A. F., Ruderman, M. A., Shaham, J. (1982) A new class of radio pulsars. *Nature*, 300, 728-730.
- [11] Zhang, C. M., Kojima, Y. (2006) The bottom magnetic field and magnetosphere evolution of neutron star in low-mass X-ray binary. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 366, 137-143.
- [12] Igoshev, A. P., Popov, S. B., Hollerbach, R. (2021) Evolution of neutron star magnetic fields. *Universe*, 7, 351.
- [13] Stairs, I. H., Thorsett, S. E. (2004) Arzoumanian, Z. (2004) Measurement of gravitational spin-orbit coupling in a binary pulsar. *Physical Review Letters*, Science, 93, 141101.
- [14] Lyne, A. G., Burgay, M., Kramer, M., Possenti, A., Manchester, R. N., et al. (2004) A Double-Pulsar System: A Rare Laboratory for Relativistic Gravity and Plasma Physics. *Science*, 303, 1153-1157.
- [15] Kaspi, V. (2009) Grand Unification of Neutron Star: XMM Observations of PSR B1845-19. XMM-Newton Proposal ID 06533001.