



一颗自由进动的磁星

高勇^{1*}, Gregory Desvignes², 邵立晶^{3,4}

1. Max Planck Institute for Gravitational Physics (Albert Einstein Institute), Potsdam D-14476, Germany;

2. Max Planck Institute for Radio Astronomy, Bonn D-53121, Germany;

3. 北京大学科维理天文与天体物理研究所, 北京 100871;

4. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

* 联系人, E-mail: yong.gao@aei.mpg.de

A freely precessing magnetar

Yong Gao^{1*}, Gregory Desvignes² & Lijing Shao^{3,4}

¹ Max Planck Institute for Gravitational Physics (Albert Einstein Institute), Potsdam D-14476, Germany;

² Max Planck Institute for Radio Astronomy, Bonn D-53121, Germany;

³ Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China;

⁴ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

* Corresponding author, E-mail: yong.gao@aei.mpg.de

doi: [10.1360/TB-2024-0538](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0538)

磁星是一类具有强磁场和长自转周期的年轻中子星。这些天体极其致密, 半径约为12 km, 但质量却可达太阳的1~2倍。在已知的30颗磁星中, 只有少数会偶尔产生射电辐射。磁星转动时, 射电束像灯塔一样扫过天空, 天文学家正是从这些规律的脉冲信号中探索中子星的奥秘。2018年末, 磁星 XTE J1810-197 在经历了X射线爆发后再次产生射电辐射, 结束了其长达十年的射电静默期。通过长时间、高频次的监测, 我们在射电偏振信号中发现射电束相对于地球的倾角发生了显著变化, 并且这种变化在几个月内逐渐消失^[1]。我们认为这种变化是由磁星的自由进动引起的, 并提出了衰减的进动模型来解释这一观测现象。这一发现不仅帮助我们更深入地理解了磁星的内部结构和辐射几何, 而且很可能排除了自由进动作为重复快速射电暴起源的理论模型。

什么是自由进动? 著名物理学家费曼在他的回忆录《别闹了, 费曼先生!》中提到了一个有趣的故事: 他在餐厅吃午饭时, 看到有人把一个盘子抛向空中。当盘子飞起时, 他注意到盘子一边在旋转, 一边在摇晃, 而且盘子上的康奈尔红色徽章的旋转速度明显比盘子的摇晃速度慢。他正好无事可干, 便拿起纸笔从理论上推导餐盘自转和晃动的速度比, 发现当晃动的角度非常小时, 徽章转动的速度正好是盘子晃动速度的一半。费曼看到的这种“晃动”便是自由进动, 是指在没有外力矩下, 非球对称刚体的旋转轴在空间中绕着角动量方向转动的一种特殊运动。

行星的固体成分能够支撑弹性形变, 因此自由进动的现象在行星中也广泛存在。例如, 地球的自由进动早在100多年前就被天文学家钱德勒观测到了, 被称为钱德勒摆动(Chandler wobble)——地球的自转轴在距北极大约10 m的地方与地球表面相交, 并围绕北极方向进动, 周期约为14个月。不同于小小的餐盘, 地球受到潮汐力的影响, 且内部存在黏滞流体, 因此, 这种晃动为何在地球长期的演化中没有消失, 依旧是一个未完全解决的问题。

中子星会做自由进动吗? 这是一个自脉冲星发现以来就一直被不断研究的问题。中子星的固态壳层和内部强磁场提供了类似于地球的“刚性”形变, 这为自由进动的产生创造了必要的条件。但是与餐盘或者地球不同, 中子星内部主要是流体, 并且中子处于超流态。这些流体与壳层相互作用, 很多理论认为这种摩擦作用会消耗掉自由进动^[2,3]。因此, 自由进动可以揭示中子星内部结构的关键信息, 包括壳层的弹性、内部磁场的强度和几何, 以及超流的存在性等, 是研究中子星内部结构的绝佳探针^[4]。

自由进动的基本物理图像如图1所示。如果一颗变形的脉冲星在做自由进动, 其角速度矢量可分解为沿角动量方向和沿形变轴方向的分量。脉冲星绕角动量方向的旋转使脉冲束像灯塔一样规律地扫过我们的视线方向, 这就是我们通常理解的自转。同时, 星体会以较慢的速率绕形变轴旋转。若假想自己站在中子星上, 则会看到自旋矢量以同样的速率绕着

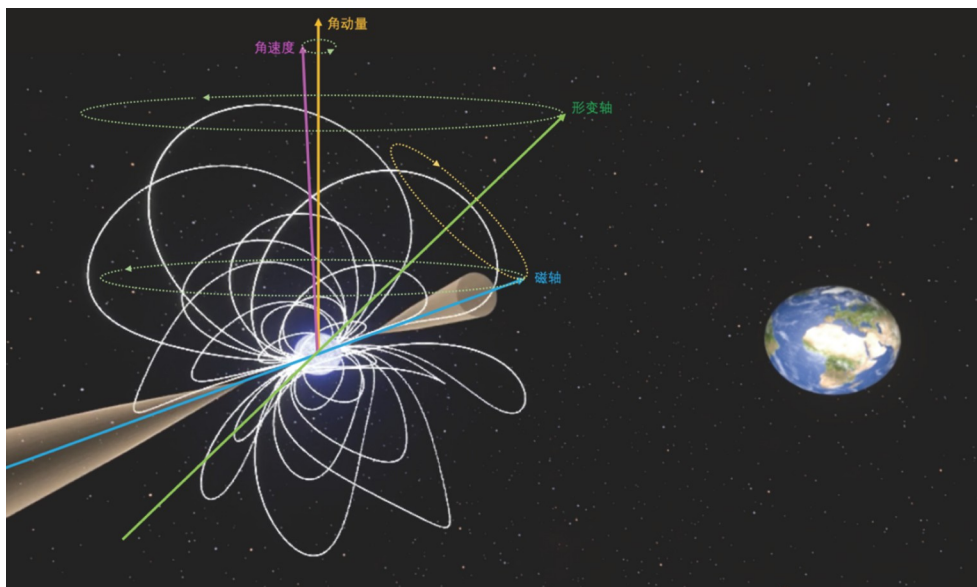


图1 (网络版彩色)磁星的自由进动. 白色的线条为扭曲的磁力线, 射电束沿着磁轴的方向. 在自由进动过程中, 射电辐射束相对于观测者的俯仰角发生变化, 导致偏振信号出现系统性变化

Figure 1 (Color online) Free precession of a magnetar. The white lines represent the twisted magnetic field lines, and the radio beam is directed along the magnetic axis. During free precession, the inclination angle of the radio radiation beam relative to the observer changes, resulting in systematic changes in the polarization signal

形变轴进动, 这与我们观察地球自由进动类似. 因此, 我们通常将星体绕形变轴转动的周期称为自由进动周期. 这个叠加在星体自转之上的运动会使辐射束相对于观测者视线的方向发生周期性的摆动, 从而调制观测到的脉冲轮廓、脉冲到达时间和偏振等特征. 这正是观测中子星自由进动的基础^[4].

自由进动的周期大约是自转周期除以形变率. 对于地球, 观测到进动的周期约为433天, 则形变率为1/433. 与地球不同, 中子星是强引力系统, 无论是壳层的弹性能还是内部磁场的磁能, 相对于引力能都微不足道, 要在其表面形成“山包”绝非易事. 目前的理论计算认为, 中子星壳层能支撑的最大形变率约为 10^{-6} ^[5], 而磁形变正比于磁感应强度的平方, 对于一般脉冲星, 若典型磁场为 10^{12} 高斯, 形变率约为 10^{-12} , 而对于磁星, 若其内部磁场可达 10^{15} 高斯, 则形变率约为 10^{-6} .

对于自转周期为秒量级的中子星, 其自由进动的周期可能长达数月甚至数年, 因此观测这一现象面临许多挑战. 此前, 人们在一些射电脉冲星的周期调制和脉冲宽度变化中发现了中子星自由进动的证据^[6]. 然而, 进一步的观测显示, 这些脉冲星可能发生了磁层模式变换, 导致辐射轮廓和周期产生调制^[7]. 因此, 自由进动的解释面临巨大的挑战. 不同于一般脉冲星, 磁星可能更容易产生自由进动: 一方面, 磁星的内部磁场可能会引起较大的磁形变; 另一方面, 磁星非常活跃, 经常产生X射线爆发活动, 使得星体外壳可能出现大幅弹性形变.

XTE J1810-197是第一颗通过分析其电磁波偏振信号来发现其自由进动现象的中子星. 偏振的特性取决于磁星磁场的几何特性, 例如磁轴相对于自转轴和视线的倾角. 从这颗磁星的射电偏振演化, 我们推断出磁轴相对于地球的方向发生了大幅的变化. 更有趣的是, 这种变化并没有周而复始持续下去, 而是在接下来的几个月里慢慢消失了.

目前, 自由进动是唯一已知的能够解释该磁星整体磁场几何变化的物理过程. 我们提出了两种可能的模型来解释这颗磁星衰减的自由进动. 第一种是率率衰减模型: 磁星在经历X射线爆发后产生较大的率率, 在随后的进动过程中, 形变逐渐减小. 由于自由进动的周期反比于形变率, 因此进动的调制效应越来越缓慢, 最终消失. 第二种是进动角衰减模型: 由于内部流体和壳层的摩擦作用, 进动逐渐被耗散, 角速度和形变轴之间的夹角逐渐减小, 直到进动消失. 两种模型都能自然地解释衰减的自由进动. 更细致地分析说明两种模型的组合, 即进动逐渐被耗散和形变逐渐减小, 能够非常好地拟合观测数据.

这颗磁星的自由进动让我们对内部结构和辐射几何有了更多的认识. 自由进动刚开始时的最大率率约为 $1.7 \times 10^{-6} \sim 2.4 \times 10^{-6}$, 这与理论上中子星壳层能够支撑的最大形变或者该磁星内部强磁场导致的磁形变量级相一致. 磁星的辐射主要集中在X射线波段, 但其辐射几何仍不清晰, 而这次观测较精确地测量了磁轴和视线相对于自转轴的夹角, 协同以往的X射线观测, 排除了一些辐射几何模型.

银河系中的磁星SGR 1935+2154产生的快速射电暴支持了磁星作为一些银河系外快速射电暴起源的理论^[8]。自由进动的模型被用来解释一些重复快速射电暴中观察到的周期性活动^[9,10]。然而,我们的发现表明,磁星的自由进动会在几个月内衰减,从而提供了排除这种模型的证据。

通过这次发现,我们认识到对磁星进行高频次的射电和

X射线观测,尤其是在爆发后不久进行的观测,对于研究自由进动至关重要。未来,我们希望通过偏振观测发现更多表现出自由进动的磁星。目前我们对自由进动衰减的物理机制仍不清楚,未来也需要进一步理解在自由进动过程中超流、强磁场和壳层之间的相互作用,并对进动做更细致的建模^[11],以期获得更多关于中子星内部结构的信息。

推荐阅读文献

- 1 Desvignes G, Weltevrede P, Gao Y, et al. A freely precessing magnetar following an X-ray outburst. *Nat Astron*, 2024, 8: 617–627
- 2 Shaham J. Free precession of neutron stars—Role of possible vortex pinning. *Astrophys J*, 1977, 214: 251–260
- 3 Sedrakian A, Wasserman I, Cordes J M. Precession of isolated neutron stars. I. Effects of imperfect pinning. *Astrophys J*, 1998, 524: 341–360
- 4 Jones D I, Andersson N. Freely precessing neutron stars: Model and observations. *Mon Not R Astron Soc*, 2001, 324: 811–824
- 5 Horowitz C J, Kadau K. Breaking strain of neutron star crust and gravitational waves. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 191102
- 6 Stairs I H, Lyne A G, Shemar S L. Evidence for free precession in a pulsar. *Nature*, 2000, 406: 484–486
- 7 Lyne A, Hobbs G, Kramer M, et al. Switched magnetospheric regulation of pulsar spin-down. *Science*, 2010, 329: 408–412
- 8 CHIME/FRB Collaboration. A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar. *Nature*, 2020, 587: 54–58
- 9 Zanazzi J J, Lai D. Periodic fast radio bursts with neutron star free precession. *Astrophys J Lett*, 2020, 892: L15
- 10 Levin Y, Beloborodov A M, Bransgrove A. Precessing flaring magnetar as a source of repeating FRB 180916.J0158+65. *Astrophys J Lett*, 2020, 895: L30
- 11 Gao Y, Shao L, Desvignes G, et al. Precession of magnetars: Dynamical evolutions and modulations on polarized electromagnetic waves. *Mon Not R Astron Soc*, 2023, 519: 1080–1097