

# 磁陀星 X 射线偏振模型与观测结果\*

陈伟<sup>1</sup> 谢斐<sup>1</sup> 葛明玉<sup>2,3</sup>

1(广西大学物理科学与工程技术学院 南宁 530004)

2(中国科学院高能物理研究所 粒子天体物理重点实验室 北京 100049)

3(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 磁陀星是磁场高达  $10^{10}\sim 10^{11}$  T 的中子星, 与普通脉冲星的性质有极大不同. 磁陀星一般与超新星遗迹成协, 存在很强的活动性, 是研究极端天体性质的重要对象, 也是快速射电暴的一种对应体. 磁陀星的磁场结构及活动能量起源一直是磁陀星研究的核心问题, 因此偏振观测信息对理解其性质具有重要意义. 自成像型 X 射线偏振望远镜 (IXPE) 观测运行以来, 已经对 4U 0142+61, SGR 1806-20, 1RXS J170849.0-400910 和 1E 2259+586 四颗磁陀星进行深度曝光观测, X 射线偏振信息可以加深对磁陀星的认识, 对磁陀星辐射模型做出验证和限制. 本文对这四颗磁陀星的观测结果进行了综合分析, 并将观测结果与主要的磁陀星模型, 即旋转矢量模型、共振康普顿模型和真空共振模型结合进行了讨论.

**关键词** 磁陀星, 磁场, X 射线偏振

**中图分类号** P141.4

## X-ray Polarization Model and Observational Results of Magnetars

CHEN Wei<sup>1</sup> XIE Fei<sup>1</sup> GE Mingyu<sup>2,3</sup>

1(School of Physics and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004)

2(Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** Magnetars are a type of neutron star with extremely strong magnetic fields ranging from  $10^{10}\sim 10^{11}$  T, which are significantly different from the properties of ordinary pulsars. They are generally associated with supernova remnants and exhibit strong activity, making them important objects for studying extreme astrophysical properties and corresponding to one type of Fast Radio Burst (FRB). The magnetic structure and the origin of the activity energy of magnetars have always been central issues in magnetar research, and thus, polarization observation information is crucial for understanding

\* 国家重点研发计划项目 (2023YFE0117200), 国家自然科学基金面上项目 (12373041), 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目 (12422306) 和广西特聘教授专项基金项目 (八桂学者) 共同资助

2024-10-28 收到原稿, 2024-12-10 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

their nature. Since the launch of the Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE), in-depth observations have been conducted on four magnetars: 4U 0142+61, SGR 1806-20, 1RXS J170849.0-400910, and 1E 2259+586, marking a deepened study of their properties. This includes the verification and limitation of the magnetar polarization model. This article summarizes the observational results of these four magnetars and discusses the findings in relation to the main magnetar models, which are the rotating vector model, the resonant Compton model, and the vacuum resonance model.

**Key words** Magnetar, Magnetic Field, X-ray polarization

## 0 引言

磁陀星 (Magnetar) 是年轻的、高度磁化的中子星, 在 X 射线波段表现出显著的活动性. 此外, 磁陀星是目前宇宙中已知磁场最强的天体, 其极端的磁场、引力与密度的结合使其成为独特的实验室, 用以探索从量子电动力学 (Quantum Electrodynamics, QED) 到广义相对论的各种物理理论在磁场极限下的表现. 在磁场中, 量子化的电子能级被称为朗道能级, 当电子的回旋能量达到其静止能量时, QED 效应变得显著, 对应的磁场被称为临界磁场 ( $B_c = 4.4 \times 10^9$  T). 绝大部分磁陀星的磁场都高于这一值, 所以在分析和讨论时需要考虑 QED 效应<sup>[1]</sup>. 磁陀星的典型自转周期为 2~12 s, 并且所有磁陀星均处于自转减速状态, 依据自转减速速率所推断的自转减速时间尺度为几千年, 暗示了磁陀星极为年轻的年龄特性<sup>[2]</sup>. 这些特性使得磁陀星在中子星的研究中占有重要地位.

所有的孤立中子星曾都被认为是射电脉冲星, 后来得益于高能电磁波的观测, 才认识到孤立中子星存在其他形式的辐射. 其中有两类具有特殊性质的 X 射线脉冲星, 根据在发现之初展现的特征, 分为软伽马射线重复暴 (Soft Gamma Repeater, SGR)<sup>[3]</sup> 和反常 X 射线脉冲星 (Anomalous X-ray Pulsar, AXP)<sup>[4]</sup>. SGR 最初与伽马射线暴 (Gamma-Ray Burst, GRB) 相关联, 都表现为硬 X 射线/软伽马射线波段上的短暂而强烈的爆发. 然而, 人们很快就认识到, 与 GRB 的一次性爆发不同, SGR 的爆发具有重复性, 这一关键差异可以明确区分二者<sup>[2]</sup>. AXP 是一类反常的 X 射线脉冲星, 其高 X 射线亮度 ( $10^{27} \sim 10^{29}$  W) 在常规脉冲星的框架内很难解释. SGR 和 AXP 的共同特点是中子星自转能量难以解释其在 X 射线波段的辐射能量, 后来发现通过周期反推的磁偶极制动磁场强度比普通脉冲星强, 推测其主要由磁能供能<sup>[5]</sup>.

如今研究已经认识到 AXP 与 SGR 并没有太大的不同<sup>[6]</sup>, 适用于 SGR 的磁陀星模型也可以运用在 AXP 上<sup>[7]</sup>, 并将 SGR 和 AXP 都归为磁陀星的一员. 虽然磁陀星最初是在 X 射线/软伽马射线中被发现, 但迄今已经在不同的波段被探测到, 揭示了其电磁辐射的多样性. 射电波段的观测是发现中子星的重要手段, 在 500 m 口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST) 建成并投入观测后, 探测中子星的能力再次获得了提升. 目前已经发现了 4000 多颗中子星, 但是其中仅有 31 颗被认定为磁陀星, 这些磁陀星主要位于银河系内, 并且集中分布在银盘区域, 少量分布在临近星系中<sup>[8]</sup>, 具体可见 Kaspi 等<sup>[8,9]</sup> 提供的在线磁陀星星表. 这些发现不仅增加了对磁陀星数量的认识, 也为研究其物理特性和活动性提供了更多数据.

磁陀星具有丰富的活动性. 磁陀星自转演化行为通常是自转减慢的, 脉冲到达时间测量的研究显示脉冲星有两类自转不稳定性, 即时间噪声 (Timing Noise) 和周期跃变 (Glitch). 时间噪声是指脉冲星自转参数发生连续的且时标通常为几个月或几年的扰动, 而周期跃变是自转频率突然增加的现象<sup>[5]</sup>. 磁陀星的爆发现象按峰值光度可分为短爆发 (Burst)、中等爆发 (Outburst) 和巨耀发 (Giant Flare)<sup>[2]</sup>. 短爆发持续时间从几毫秒到几秒, 峰值光度为  $10^{32} \sim 10^{34}$  W; 中等爆发持续时间为几周到几个月, 峰值光度为  $10^{34} \sim 10^{37}$  W; 巨耀发则是一种罕见且能量极高的事件, 爆发可持续数百秒, 峰值光度为  $10^{37} \sim 10^{40}$  W<sup>[2]</sup>. 多数情况下, 磁陀星的爆发活动会伴随着周期跃变<sup>[10]</sup>, 这种可能的相关性既可以帮助理解其内部的物理过程, 也暗示了磁场特性与磁陀星活动之间存在着某种联系.

这种联系在磁陀星的磁场特性中表现得尤为突出. 尽管磁陀星通常具有极高的磁场, 但也存在“低

磁场”的例外,例如 SGR 0418+572. 该磁陀星的偶极磁场强度仅为  $10^8$  T, 比典型磁陀星低两个量级. 在其能谱中, 发现了可能的质子回旋共振吸收结构, 且吸收强度随相位变化. 这表明, SGR 0418+572 的磁场由远超偶极磁场强度的多极磁场主导. 这一发现意味着, 中子星即使没有很高的偶极磁场强度, 也能表现出类似磁陀星的活动<sup>[11]</sup>. 当人们寻找是否还有其他中子星也表现出类似磁陀星的活动时, 自然而然地将目光看向了磁场强度同样能达到  $10^9$  T 的强磁场脉冲星, 例如磁场强度  $B \approx 5 \times 10^9$  T 的 PSR J1846-0258. 2006 年, 在 PSR J1846-0258 观测到了持续约 6 周的 X 射线爆发活动, 并伴随有类似磁陀星的短爆发及周期跃变行为<sup>[12,13]</sup>. 之后, 又在年轻的射电脉冲星 PSR J1119-6127 中观测到了类似的情况, 从而证实了强磁场脉冲星也存在类似磁陀星的耀发行为<sup>[14]</sup>.

磁陀星还与一种独特的宇宙现象——快速射电暴 (Fast Radio Burst, FRB) 相关联, 这是一种仅维持数毫秒的射电脉冲爆发现象. 自 2007 年第一例 FRB 被发现以来, 人们对这种极端现象的物理机制知之甚少. 直至 2020 年 4 月 28 日, 在银河系内观测到极强、持续时间为毫秒的快速射电暴 FRB 200428, 同时还伴随着 X 射线爆发. 在射电观测和 X 射线观测证认中, 确认了该事件与磁陀星 SGR 1935+2154 成协, 证实了磁陀星可以产生 FRB<sup>[15-21]</sup>. 尽管无法用磁陀星来完美解释所有观测到的 FRB, 但是确认有 FRB 事件与磁陀星成协仍然是一个重要的突破, 这表明磁陀星可能是 FRB 的一个重要的起源天体, 这对理解 FRB 的起源和辐射机制提供了新的线索<sup>[22-25]</sup>.

作为一类表面磁场强度极高的中子星, 磁陀星表面的辐射特性受到磁场的强烈影响. 在强大的磁场作用下, 等离子体和真空的光学特性发生变化, 使得从磁陀星表面发出的辐射呈现出高度极化的特点<sup>[26]</sup>. 强磁场的存在使得等离子体展现出各向异性和双折射性质, 从而影响光子的传播路径和偏振模式. 此外, 强磁场环境下的真空极化效应也对光子的行为产生重要影响<sup>[27]</sup>. 这些过程共同作用, 导致磁陀星辐射的偏振状态具有独特的特征. 偏振理论预言来自磁陀星的 X 射线辐射应该是高度极化的<sup>[28]</sup>.

随着成像型 X 射线偏振望远镜 (Imaging X-ray Polarimetry Explorer, IXPE) 的发射, 自 OSO-8 卫

星以来中断了近 40 年的 X 射线偏振观测得以重启, X 射线偏振的精确测量得以实现. 本文将基于磁陀星相关的偏振物理模型, 与 IXPE 对磁陀星的观测结果结合进行讨论.

## 1 IXPE 望远镜

IXPE 是由美国航空航天局 (NASA) 和意大利航天局 (ASI) 合作研制的一颗 X 射线偏振望远镜, 旨在通过对天体 X 射线辐射的偏振度 (PD) 和偏振角 (PA) 进行测量, 帮助理解天体的磁场结构、粒子加速以及辐射机制等<sup>[29-33]</sup>. 望远镜于 2021 年 12 月 9 号发射升空, 在轨运行两年多的时间, 以前所未有的偏振灵敏度, 在多类高能天体的观测研究中取得突破性进展, 标志着 X 射线偏振精确测量新时代的开启<sup>[34-40]</sup>.

IXPE 望远镜由 X 射线掠入射镜子和气体像素型偏振探测器组成, 其探测偏振的基本原理是基于光电效应. 在  $1 \sim 10$  keV 能段, 光子与物质的相互作用以光电效应占绝对主导<sup>[41]</sup>. 如图 1 所示<sup>[31]</sup>, 在光电效应中, 光子的能量被物质吸收, 同时原子核外的电子被激发, 发射出的电子称为光电子, 其动能是入射光子的能量与电子结合能之差, 出射方向的角分布 (光电效应微分截面) 满足以下公式:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \frac{Z^5}{137^4} \left( \frac{m_0 c^2}{h\nu} \right)^{7/2} \frac{4\sqrt{2}\sin^2\theta\cos^2\phi}{(1-\beta\cos\theta)^4} \propto \cos^2\phi. \quad (1)$$

其中,  $Z$  为介质原子序数,  $h\nu$  为入射光子能量,  $m_0$  为电子质量,  $r_0$  为经典电子半径,  $c$  为真空光速,  $\beta$  为电

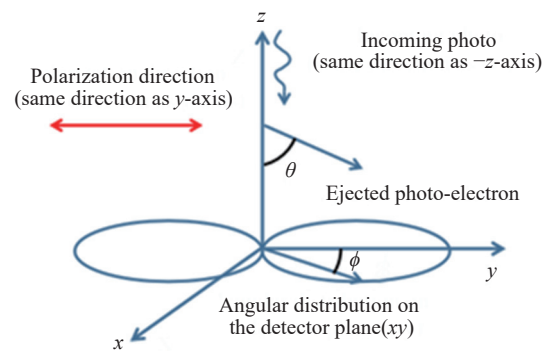


图 1 光与物质发生光电效应作用截面

Fig. 1 Cross-section of the photoelectric effect between light and matter

子速度与光速之比,  $\theta$  为光电子出射角;  $\phi$  角为光电子出射方向在  $xy$  平面内的投影与入射光子偏振方向的夹角, 即出射方位角;  $\sigma$  为散射截面, 每个散射角度的散射截面大小不一样, 通过对不同立体角  $\Omega$  进行微分获得微分散射截面<sup>[41]</sup>. 因此, 光电子出射方位角的统计分布将服从周期为  $\pi$  的余弦函数, 并且在入射光的偏振方向上有极大值. 光电子在介质中穿行时, 会通过电离和库仑散射与介质原子相互作用, 留下一条电子-离子径迹<sup>[42]</sup>, 通过测量光电子径迹在平行于探测器平面内的二维投影可获取入射 X 射线的偏振信息.

IXPE 望远镜主要参数如表 1 所示<sup>[30]</sup>, 其有效能段为 2~8 keV, 在这个能区内望远镜具有较高的有效面积. 在 2 keV 以下探测器的系统误差较大<sup>[43]</sup>, 8 keV 以上探测器有效面积下降同时本底增加, 不利于观测<sup>[30]</sup>. IXPE 望远镜为研究黑洞以及中子星等相关天体提供全新而有力的工具. 对于磁陀星而言, 偏振测量可以帮助理解磁陀星的磁层结构、表面的物质

状态, 包括是否存在裸露的凝聚表面还是被大气所包围, 以及是否存在真空双折射效应<sup>[44]</sup>. 截至目前, IXPE 望远镜已经对 4 颗磁陀星进行了观测并获得了其偏振信息, 即 4U 0142+61<sup>[45]</sup>, 1RXS J170849.0-400910<sup>[46]</sup>, SGR 1806-20<sup>[47]</sup> 和 1E 2259+586<sup>[48]</sup>, 其基本信息可参见表 2.

## 2 与磁陀星偏振相关的物理模型

磁陀星的理论模型预言其辐射存在偏振, 偏振程度取决于磁陀星磁层的物理状态以及磁层中发生的物理过程. 当 X 射线光子穿过真空的强磁场时, 其辐射分成两种模式, 即寻常光 (O-mode) 和非寻常光 (X-mode). 磁陀星 X 射线辐射偏振的起源主要有三种<sup>[49]</sup>: 一种是来自中子星表面的热光子本身就是有偏的; 第二种是光子通过散射变成有偏的; 第三种是光子在偏振极限半径内传播, 因为真空极化效应改变偏振状态<sup>[26,27,50]</sup>.

### 2.1 旋转矢量模型

对于普通脉冲星, 通常使用旋转矢量模型 (Rotating Vector Model, RVM) 来描述和获取磁场的几何信息, 这是 Radhakrishnan 与 Cooke 在研究 Vela 脉冲星 (PSR B0833-45) 的偏振位置角随相位变化时提出的几何模型<sup>[51]</sup>. 在磁偶极的假设下, 观测到的偏振角呈典型的 S 形, 可被旋转矢量模型很好地描述. 图 2 给出了在旋转磁偶极条件下的脉冲星模型, 从

表 1 IXPE 望远镜的主要性能参

Table 1 IXPE main parameters

| 参数    | 数值                                   |
|-------|--------------------------------------|
| 工作能段  | 2~8 keV                              |
| 视场    | $(12.9')^2$                          |
| 角分辨率  | $< 30''$                             |
| 能谱分辨率 | 在 5.9 keV 约为 20%                     |
| 有效面积  | 每个探头在 4.5 keV 约为 200 cm <sup>2</sup> |

表 2 IXPE 已观测报道的四颗磁陀星的基本信息

Table 2 Basical information about the four magnetars

| 参数                                          | 4U 0142+61                                           | 1RXS J170849.0-400910                               | SGR 1806-20                                          | 1E 2259+586                                          |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 赤经                                          | 01 <sup>h</sup> 46 <sup>m</sup> 22 <sup>s</sup> .407 | 17 <sup>h</sup> 08 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> .87 | 18 <sup>h</sup> 08 <sup>m</sup> 39 <sup>s</sup> .337 | 23 <sup>h</sup> 01 <sup>m</sup> 08 <sup>s</sup> .295 |
| 赤纬                                          | +61°45' 03".19                                       | -40°08' 52".44                                      | -20°24' 39".85                                       | +58°52' 44".45                                       |
| 距离/(kpc)                                    | 3.6 ± 0.4                                            | 3.8 ± 0.5                                           | 8.7 <sup>+1.8</sup> <sub>-1.5</sub>                  | 3.2 ± 0.2                                            |
| 磁场/(10 <sup>10</sup> T)                     | 1.3                                                  | 4.7                                                 | 20                                                   | 0.59                                                 |
| 周期/s                                        | 8.7                                                  | 11.0                                                | 7.5                                                  | 7.0                                                  |
| 周期导数/(10 <sup>-11</sup> s·s <sup>-1</sup> ) | 0.20                                                 | 1.95                                                | 49.5                                                 | 0.05                                                 |
| X 射线流量                                      | 67.9                                                 | 24.3                                                | 18 ± 1                                               | 14.1 ± 0.3                                           |
| 偏振度/(%)                                     | 13.5 ± 0.8 <sup>[45]</sup>                           | 35.1 ± 1.6 <sup>[46]</sup>                          | 31.6 ± 10.5 <sup>[47]</sup>                          | 5.6 ± 1.4 <sup>[48]</sup>                            |
| 能段/keV                                      | 2 ~ 8                                                | 2 ~ 8                                               | 4 ~ 5                                                | 2 ~ 8                                                |

注 参数赤经、赤纬、距离、X射线流量信息来源于网站[https://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html#tab2%](https://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html#tab2%20), 参数对应参考文献可在网站中进行查阅; 磁场、周期、周期导数信息来自参考文献<sup>[10]</sup>; 能段为偏振度结果对应能段; kpc为千秒差距. X射线流量单位: 10<sup>-15</sup> W·m<sup>-2</sup>. 流量为2~10 keV能段下, 表格中对应距离下的结果.

图2可以看出各几何参数的位置关系. 磁轴与自转轴之间的角度为磁倾角( $\alpha$ ), 视线与自转轴之间的夹角为视倾角( $\zeta$ ); 自转轴和磁轴所在的平面为子午面( $\phi = 0$ ); 视线与磁轴之间的最近距离为碰撞角( $\beta$ ). 从图2可知,  $\beta = \zeta - \alpha$ , 位置角 $\psi$ 可以由下式通过自转相位 $\phi$ 计算得到, 即

$$\tan(\psi - \psi_0) = \frac{\sin\alpha \sin(\phi - \phi_0)}{\sin(\alpha + \beta) \cos\alpha - \cos(\alpha + \beta) \sin\alpha \cos(\phi - \phi_0)}. \quad (2)$$

在中子星磁极冠区, 开放磁力线所包围的区域会形成一个空心辐射锥, 高能电子沿磁力线向外运动并产生具有强偏振的曲率辐射, 其偏振面在磁轴和相应的磁力线所形成的平面内<sup>[5]</sup>. 在视线扫过辐射锥的过程中, 射电望远镜依次接收到来自不同磁力线发射的曲率辐射, 因此其偏振面在不断地改变, 即线偏振位置角变化反映的是磁力线平面在视平面中投影的角度变化. 当视线从靠近辐射锥边缘的部位扫过时, 偏振位置角变化很小, 而当视线从靠近辐射锥中心的部位扫过时, 偏振位置角的变化较大, 因此曲线整体呈现出S形<sup>[5]</sup>. 虽然RVM最初是针对射电脉冲星的极冠区辐射提出的, 但考虑到强磁场中真空双折射的影响, 这一模型也被成功应用于解释磁陀星的X射线偏振观测. 在磁陀星的情况下, 光子的偏振方向在传播至远处时会与当地的磁场方向对齐, 而磁陀星的大尺度磁场主要由偶极场主导, 这使得RVM在分析磁陀星的偏振特性时仍然有效.

与普通的脉冲星相比, 磁陀星可能具有扭曲的磁场, 如图2中的红线所示. 根据扭曲磁层模型, 扭曲的偶极磁场具有一个环形磁场分量, 这种环形分量的强度足以使磁陀星壳层发生形变, 从而使外部磁场扭曲<sup>[52]</sup>. 环形分量会导致辐射位置角需要增加修正量, 对于较小的扭曲, 磁场可以被视为一个偶极磁场(纯径向)加上环形分量<sup>[53]</sup>, 相应的位置角也只需要在偶极情况下加修正. 与偶极场相比, 扭曲的偶极场存在一个额外的描述参数, 即扭曲参数 $n$  ( $n \in (0, 1)$ ,  $n = 1$  对应偶极情况,  $n = 0$  对应磁单极情况)<sup>[54]</sup>. 图3<sup>[53]</sup>给出了偶极磁场模型与扭曲偶极磁场模型的偏振位置角随脉冲相位变化的对比情况, 从图3可以看出, 扭曲磁场导致位置角改变的效应是可区分的, 利用这个模型可以解释射电波段中观测到的一些磁星偏振位置角演化的结果<sup>[53]</sup>.

在现有X射线观测数据中, 即使不考虑扭曲磁层的修正, RVM模型(如果能够拟合目标磁陀星)依然可以很好地拟合数据, 这可能是由于当前X射线望远镜的观测精度尚不足以分辨出扭曲磁层修正带来的影响. 随着未来望远镜技术的发展, 或许能够更

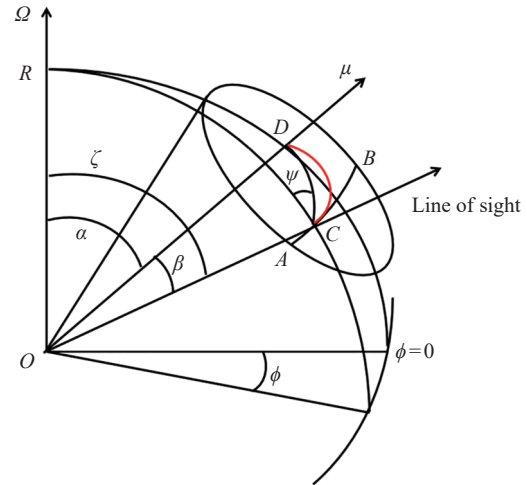


图2 脉冲星的模型地球上显示的圆环代表了辐射束的投影.  $AB$  弧线表示视线在地球上形成的投影. 红色实线代表扭曲的偶极场

Fig. 2 Pulsar model diagram, where the circle represents the projection of the radiation beam on the celestial sphere. The arc  $AB$  is the projection of the line of sight on the celestial sphere. The solid red line represents a twisted dipole field

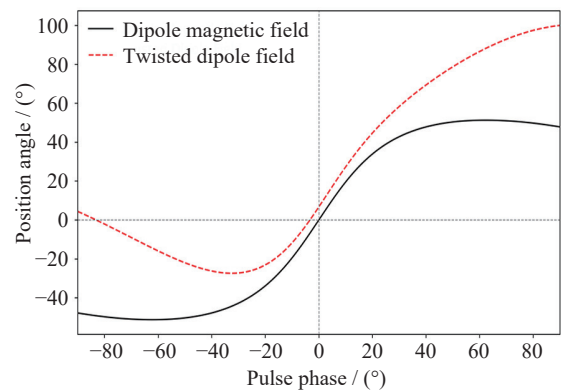


图3 在几何参数为 $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 20^\circ$ ,  $\zeta = 65^\circ$ , 扭曲参数 $n = 0.5$ 下的偏振位置角随脉冲相位的变化

Fig. 3 Variation diagram of the polarization position angle with the pulse phase under the geometric parameters of  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 20^\circ$ ,  $\zeta = 65^\circ$  and twist parameter  $n = 0.5$

好地检验扭曲磁层修正对观测数据的影响.

## 2.2 共振康普顿散射

从微观角度来看, 在强磁场中, 电子垂直于磁场方向的动量被量子化, 形成离散的朗道能级<sup>[55]</sup>. 这些能级具有特定的能量, 并且电子可以沿着磁场线自由移动. 当光子与这些电子发生非弹性散射时, 如果光子的能量和入射角度合适, 可以将电子激发到更高的朗道能级. 当入射光子的能量接近电子的朗道能级间隔时, 共振散射的作用截面会增大<sup>[56]</sup>. 随后电子在退激发回基态的过程中会发射出“子代”光子, 这些光子的能量对应于相邻朗道能级之间的能量差<sup>[55]</sup>.

共振康普顿散射 (Resonant Compton Scattering, RCS) 模型的基本观点认为, 磁陀星的软 X 射线辐射 (低于 10 keV) 是由中子星表面热辐射与热的磁层等离子体发生 RCS 产生的<sup>[57]</sup>. Rea 等<sup>[57]</sup> 使用这个模型成功拟合了 10 颗磁陀星 (当时已知 15 颗磁陀星) 的软 X 射线能谱. 如果在中子星的磁层中充满了大量热等离子体, 那么从中子星表面发出的热辐射 (或准热辐射) 在穿过磁层时将经历多次 RCS, 这个过程的效率是可以用量深来量化的<sup>[57]</sup>, 同时, 这个过程会影响辐射的能谱和偏振状态<sup>[58]</sup>.

鉴于 RCS 模型在磁陀星能谱拟合上的良好表现, 在考虑磁陀星的能谱与偏振时无法忽视这个模型. 在 Caiazzo 等<sup>[58]</sup> 对磁陀星 X 射线辐射的偏振模拟工作中, 便考虑了 RCS 对偏振的影响. 他们的模拟结果显示, 在硬 X 射线能段, RCS 的不同模型 (比如考虑不同的辐射区域、不同的表面辐射机制等) 的偏振度都趋近于 30%<sup>[58]</sup>. 对于软 X 射线辐射的偏振度, 不同的辐射机制和散射机制会导致显著不同的偏振结果<sup>[58]</sup>.

## 2.3 量子电动力学效应

在强磁场环境下, QED 效应变得显著, 真空中的虚正负电子对引起的真空极化效应会改变等离子体的介电性质和光子的偏振模式, 进而改变辐射的不透明度<sup>[59]</sup>. 在这种强磁场的影响下, X 射线光子在传播过程中会发生真空双折射<sup>[27]</sup>. 这意味着光子的两种偏振模式将以不同的速率传播, 导致偏振态的变化. 在不考虑 QED 效应的情况下, 中子星表面磁场方向的不同, 会导致消偏效应, 从而降低观测到的偏振度; 在考虑 QED 效应的情况下, 双折射效应会导致观测到的偏振度显著不同. 因为在 QED 效应的影响下, 磁

层中的偏振模式不再与磁场方向无关, 而是偏振方向随着磁场的方向变化, 直到远离磁陀星表面<sup>[25]</sup>. 这种效应导致不同辐射区域的偏振方向趋于一致, 因此观测到的磁陀星热辐射的偏振度应该较高<sup>[25,60]</sup>.

当真空双折射与磁化等离子体引起的双折射结合时, 真空极化可以在较小的场强下显著影响辐射传播<sup>[27]</sup>. 当等离子体和真空极化对介电张量的贡献达到平衡时, 就会出现“真空共振”, 即真空共振由等离子体引发的双折射和强磁场中的量子电动力学效应引发的真空双折射的综合效应产生<sup>[27,61]</sup>. 根据 Lai 等<sup>[61]</sup> 的工作, 在中子星大气中沿密度梯度传播的光子可以在真空共振下从一种偏振模式变换为另一种偏振模式, 这种变换可能对能量大于几 keV 的光子特别显著, 而 IXPE 的工作范围正好是 2~8 keV. 磁化等离子体中光子模式分类的标准方法依赖于下式:

$$|K| = \frac{|\mathbf{E}_x|}{|\mathbf{E}_y|}. \quad (3)$$

对于非寻常光, 有  $|K| \ll 1$ , 主要垂直于  $\hat{\mathbf{k}} - \hat{\mathbf{B}}$  平面偏振; 对于寻常光, 则有  $|K| \gg 1$ , 主要平行于  $\hat{\mathbf{k}} - \hat{\mathbf{B}}$  平面偏振<sup>[61]</sup>. 其中,  $\mathbf{E}_x$  是光子沿  $\hat{\mathbf{k}} - \hat{\mathbf{B}}$  平面的电场分量,  $\mathbf{E}_y$  是光子垂直于  $\hat{\mathbf{k}} - \hat{\mathbf{B}}$  平面的电场分量,  $\hat{\mathbf{k}}$  是光子波矢,  $\hat{\mathbf{B}}$  是外界磁场. 在这个分类下, 非寻常光和寻常光与物质的相互作用是不同的, 软 X 波段的非寻常光比寻常光不透明度低<sup>[27,61]</sup>. 所以, 非寻常光能从更深、更热的中子星大气中逃逸出来, 并且产生具有很高线偏振度的辐射<sup>[27]</sup>. 如图 4<sup>[61]</sup> 所示, 如果等离子体的密度变化足够平缓, 则在高密度下产生的寻常光在向外传播时将保持在  $K_+$  轨迹上, 并且在通过共振密度点时, 会逐渐转变为非寻常光. 图 4 中  $Z$  为原子序数,  $A$  为质子数, 电子分数表征了电子占比. 在这个过程中, 光子的偏振方向会发生 90° 的旋转<sup>[61]</sup>. 下面来考虑在不同条件下, 何种光子模式占优情况. 以下考虑的是一种简化的磁陀星大气模型, 大气由单一离子种类和电子组成, 并且辐射传输中只考虑自由-自由不透明度.  $\rho_v$  为真空共振密度,  $B_{OV}$  被定义为偏振角 90° 摆动的临界磁场强度,  $E_{ad}$  代表光子能量的一个特定阈值, 在这个阈值以上, 光子的偏振模式会发生变换. 非寻常光的光球密度  $\rho_x$  总是大于寻常光的光球密度  $\rho_o$  的, 光球位于光深的 2/3 处, 所以会有以下情况. 一个情况是当磁场强度  $B < B_{OV}$  时, 会有  $\rho_v < \rho_o < \rho_x$ : ① 在光子能量小于  $E_{ad}$  的能量范围内, 因为不发生模式变换, 所以非

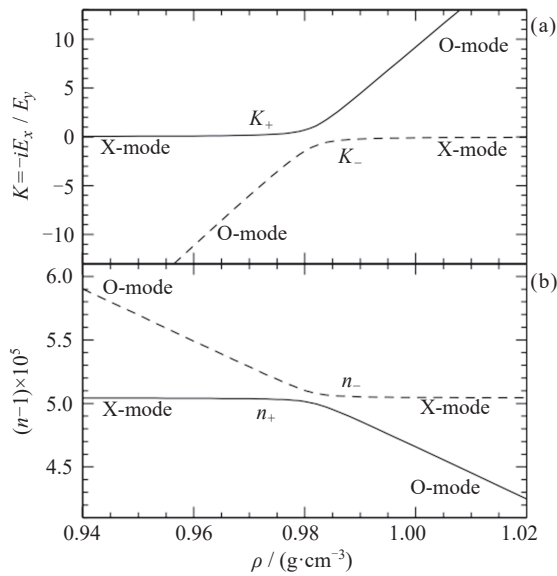


图4 光子模式的偏振参数(a)和折射率(b)随真空共振附近密度的变化,其中  $B=10^{10}$  T,  $E=1$  keV, 电子分数  $Y_e = Z/A = 1$ , 磁场与波矢的夹角  $\theta_B = 45^\circ$

Fig. 4 Polarization parameters (a) and refractive indices (b) of photon modes as functions of density near the vacuum resonance for  $B=10^{10}$  T,  $E=1$  keV, electron fraction  $Y_e = Z/A = 1$ , and the angle between the magnetic field and the wave vector  $\theta_B = 45^\circ$

寻常光在辐射传输中占主导地位; ② 在光子能量大于  $E_{\text{ad}}$  的能量范围内, 占主导的非寻常光通过真空共振处时模式变换为寻常光, 所以此时寻常光在辐射传输中占主导地位. 另一个情况是当磁场强度  $B > B_{\text{OV}}$  时, 会有  $\rho_o < \rho_v < \rho_x$ ; ③ 在光子能量小于  $E_{\text{ad}}$  的能量范围内, 由于不发生模式变换, 与①相似, 非寻常光在辐射传输中占主导地位; ④ 在光子能量大于  $E_{\text{ad}}$  的能量范围内, 占据主导的寻常光在真空共振处模式变换为非寻常光, 因此在  $B > B_{\text{OV}}$  的情况下, 非寻常光总是占主导<sup>[62]</sup>. 更多信息可参见文献 [27] 和 [62].

## 2.4 磁陀星的表面辐射机制

磁陀星的辐射能谱和偏振特性都取决于磁陀星表面的物理状态, 所以确定磁陀星表面的物理状态对理解磁陀星的辐射过程有着重要的作用. 中子星表面可能覆盖着一层几何薄 (典型尺度为  $0.1 \sim 10$  cm)、光学厚的大气层<sup>[28]</sup>. Kelly 等<sup>[63]</sup> 提出了磁陀星大气的数值模型, 模型考虑了真空修正的影响, 并研究了完全和部分绝热模式变换对磁陀星辐射偏振特性的影响. 他们的研究结果显示, 模式变换对高磁化中子星

大气的偏振辐射有显著影响; 在没有真空贡献的标准等离子体大气中, 辐射是高度极化的, 主要由非寻常光的光子主导<sup>[63]</sup>. 当光子能量在  $0.1 \sim 10$  keV 的范围内时, 偏振度会略微增加, 而偏振角保持不变. 考虑真空修正的模型显示, 真空修正会降低大气辐射的偏振度<sup>[63]</sup>.

强磁场可以改变电子的能级, 在垂直磁场的方向上对电子运动进行限制<sup>[58]</sup>. 另外, 当磁场 ( $B \geq 2.4 \times 10^8$  T) 强到足以使电子回旋半径小于玻尔半径时, 物质的性质会发生实质性变化<sup>[28]</sup>. 在这种条件下, 高度拉伸的原子可以形成分子链, 这可能导致上方的大气层经历相变, 下沉到地壳上, 暴露出星体的凝聚表面, 即具有足够强的磁场和表面合适温度下, 磁陀星可能形成金属或液态表面<sup>[28]</sup>. 所以, 同时具有足够强的磁场以及合适的表面温度的磁陀星可能直接从金属或液态表面发出热辐射<sup>[58]</sup>. 区分磁陀星是否拥有凝聚表面或大气层的难点在于, 凝聚表面发出的光谱在电子等离子体频率之上类似于热辐射和黑体辐射, 与研究预期的磁化大气层的辐射非常相似<sup>[28]</sup>. 在这一方面, X 射线偏振探测可以提供一种独立的方法来分辨这两种辐射模型. 在  $2 \sim 10$  keV 能段, 从裸露的凝聚表面发出的辐射预计只有弱的偏振 ( $\leq 30\%$ ), 而来自大气的辐射具有相当大的偏振 ( $70\% \sim 80\%$ ), 并以非寻常光为主<sup>[28]</sup>.

## 3 现有观测结果与模型讨论

### 3.1 4U 0142+61

4U 0142+61 作为一个反常 X 射线脉冲星, 长期以来一直是研究的焦点. Wang 等<sup>[64]</sup> 2006 年基于光学和红外数据重建了 4U 0142+61 低能能谱的能量分布, 发现其与存在回落盘的模型吻合. Ertan 等<sup>[65]</sup> 在 2007 年利用 4U 0142+61 的光学和红外数据进一步分析后发现, 其与气体回落盘模型非常吻合, 这是首次在 AXP 周围发现气体回落盘. 2016 年 Tong 等<sup>[66]</sup> 从磁陀星的自转演化出发, 指出 4U 0142+61 可能对应于带有吸积盘的正常磁陀星一类. 2021 年 NuSTAR 卫星探测到来自 4U 0142+61 的硬 X 射线辐射, 具有  $8.68917$  s 的周期和  $5.5 \times 10^4$  ks 或  $2.25 \times 10^4$  ks 的脉冲相位调制, 这种调制可以用一个开普勒超新星回落盘的进动自然解释<sup>[67]</sup>, 并且这种调制与 2006 年 Wang 等<sup>[64]</sup> 的观测结果相符.

IXPE 对磁陀星 4U 0142+61 的观测结果<sup>[45]</sup>显示, 在 2~8 keV 整个能段的积分偏振度为  $13.5\% \pm 0.8\%$ , 并且偏振度随能量变化: 在 2~4 keV 处, 偏振度为  $15.0\% \pm 1.0\%$ ; 在 4~5 keV 能段没有探测到显著的偏振信号; 在 5.5~8 keV 处偏振度上升至  $35.2\% \pm 7.1\%$ . 同时, 偏振角在 4~5 keV 附近也发生  $90^\circ$  的变化<sup>[45]</sup>. 该结果表明, 4U 0142+61 的 X 射线辐射由偏振模式不同的两个成分构成. 这些结果与凝聚表面辐射加上 RCS 的模型一致, 该模型认为磁陀星凝聚表面的热辐射在穿越其强磁场区域时, 与磁层中的带电粒子发生散射和相互作用, 导致辐射特性改变<sup>[45]</sup>. 在这个框架下, 中子星表面的热辐射贡献了 X 射线的低能部分, 而高能部分则由在磁层中经历 RCS 的光子主导.

Taverna 等<sup>[45]</sup>利用数值计算的方法解释 4U 0142+61 的偏振观测结果. 来自赤道带的凝聚铁表面的辐射产生了低能量 (2~4 keV) 的寻常光光子 (偏振度约为 15%). 这部分寻常光经过 RCS 产生了能量更高 (5.5~8 keV)、偏振度更高 (约为 35%) 的非寻常光, 同时偏振角发生了  $90^\circ$  的偏转. 其中, 在二维和三维的中子星磁热演化计算中, 为了满足在 2~4 keV 所观测到的偏振度, 赤道附近需有一个热的带状区域, 即辐射带<sup>[45]</sup>. 在 Thompson 等<sup>[52]</sup>的工作中, 同样指出离开中子星表面的辐射在近赤道平面附近发生强烈的 RCS, 而在极点附近辐射几乎不被散射. 4U 0142+61 的偏振角随相位的演化与旋转矢量模型的预测高度一致, 这进一步支持了该模型的有效性.

对于磁陀星是否有大气层或凝聚表面, 一直备受争议, 但随着 IXPE 对 4U 0142+61 的观测结果发表, 人们从中看到了支持磁陀星拥有稀薄大气以及凝聚表面的证据, 这将有助于对磁陀星的辐射机制进行更好的限制. 但对于 Taverna 的观点, 也存在不同的看法. Lai<sup>[62]</sup>提出了上述模型存在的三个主要问题. ① 4U 0142+61 的表面温度和磁场强度使得其不太可能拥有凝聚表面, 即使表面主要由铁组成; ② 就算在满足凝聚铁表面的假设下, 也需要一个异常高的磁场强度才能使得辐射主要由寻常光主导; ③ 假设低能光子主要由寻常光主导, 意味着中子星的自转轴 (在天空平面上投影) 与真实运动方向正交, 这与许多的观测证据相矛盾<sup>[62]</sup>. 对于 4U 0142+61 的偏振角摆动, Lai<sup>[62]</sup>证明了还可以通过磁陀星大气中真空共振

处的光子偏振模式变换来解释. 他的这一解释表明, 4U 0142+61 的大气可能是由部分电离的重元素组成的, 其表面磁场相当于或小于  $10^{10}$  T, 这与自转减速推算出的偶极场一致, 并且在他的解释中自转轴与真实运动方向一致, 符合普遍的观测结果<sup>[62]</sup>.

### 3.2 1RXS J170849.0-400910

RXS J170849.0-400910 (简称 1RXS J1708) 不仅是第一颗被观测到周期跃变的磁陀星<sup>[68]</sup>, 也是一颗频繁发生周期跃变的天体源<sup>[69,70]</sup>.

IXPE 望远镜在 2022 年 9 月 19—29 日和 2022 年 9 月 30 日至 10 月 8 日对磁陀星 1RXS J1708 进行了约  $8.37 \times 10^5$  s 观测, 并与 Swift 以及 NICER 的数据进行了联合分析<sup>[46]</sup>. 这颗磁陀星在 2~8 keV 能量范围内的偏振度约为 35%. 在偏振角保持不变的情况下, 相位平均偏振信号随能量的增加而显著增加, 从 2~3 keV 时的 20% 增加到 6~8 keV 时的 80%. 这表明, 辐射主要在一个方向上被偏振. 偏振度和偏振角也随自转相位的变化而变化, 其中偏振度与 2~8 keV 和 2~4 keV 能段的源计数呈现负相关的趋势<sup>[46]</sup>.

1RXS J1708 偏振角基本保持在  $60^\circ$  且不随能量演化, 而 4U 0142+61 却发生了  $90^\circ$  的偏振角旋转, 可见 1RXS J1708 的偏振特性与 4U 0142+61 的偏振特性大相径庭. 此外, 1RXS J1708 在较高能量下观测到的偏振度非常高, 但 RCS 机制却无法产生这种程度的偏振度, 这表明也许在 1RXS J1708 的框架下 RCS 并不起作用, 或者至少对在 IXPE 能量范围内主要的光子影响不大<sup>[46]</sup>. 偏振角没有变化, 表明 2~8 keV 范围内的辐射由单一模式主导. 另一种模式的相对贡献在较低能量时更大, 这也解释了较低能量时偏振程度较低. 1RXS J1708 与 4U 0142+61 呈现不相同的结果, 为研究留下来更多的讨论空间. 如果假设辐射来自磁陀星表面, 那么只要星体的一部分被大气覆盖, 就可以获得高能区观测到的 70%~80% 的偏振度<sup>[46]</sup>. 然而, 标准大气模型的辐射很难解释低能区在 1RXS J1708 中观测到的约 20% 的偏振度 (除非观测几何非常特殊). 由于温度分布不均匀, 所以磁陀星表面的一些区域温度很低, 低到足以发生相变, 将大气转变为磁性凝聚状态. 从凝聚表面发出的辐射可能是寻常光或非寻常光, 但偏振度都较低 ( $PD \leq 20\%$ )<sup>[46]</sup>. 如果磁陀星上同时存在这样的冷凝聚区

域和大气覆盖的较热区域, 就可以解释 IXPE 对 1RXS J1708 的观测结果<sup>[46]</sup>.

在正式观测前, 通常会对 1RXS J1708 有所预期, 希望其结果能对真空双折射做出检验或限制. QED 真空双折射可以强烈地影响无穷远处的偏振特性, 导致观测到的偏振度增强, 1RXS J1708 如此强的偏振度似乎符合这样的预期. 然而, QED 效应的检测与磁陀星表面辐射区域的大小密切相关<sup>[71]</sup>. 正如 Van Adelsberg 等<sup>[71]</sup>所讨论的, 如果辐射来自一个小的极冠, 由于几何效应引起的消偏并不存在, 因此在计算模型时考虑或不考虑真空双折射的预期是相同的. 对于 1RXS J1708, 辐射区域的尺度较小, 对真空双折射不足以进行强有力的检验或限制.

### 3.3 SGR 1806-20

在已知磁陀星中, SGR 1806-20 拥有最强的磁场 (可以达到  $10^{11}$  T<sup>[72]</sup>). SGR 1806-20 还是重要的巨耀发研究对象. 到目前为止, 磁陀星的巨耀发样本很少, 除了在 2004 年 12 月从 SGR 1806-20 观测到的巨耀发事件以外<sup>[73]</sup>, 在银河系中只观测到来自 SGR 1900+14 的巨耀发事件<sup>[74]</sup>. 在本星系群之外也有一些巨耀发的事件 (例如来自大麦哲伦云的 SGR 0526-66 的巨耀发事件<sup>[75]</sup>、来自 NGC 253 星系的 GRB 200415 A 事件<sup>[76]</sup>和来自 M82 星系的 GRB 231115 A 事件<sup>[77]</sup>).

IXPE 在 2023 年 3 月 22 日至 4 月 13 日对 SGR 1806-20 进行了约  $9.47 \times 10^5$  s 的观测, 期间与 XMM-Newton 进行了约  $4.5 \times 10^4$  s 的联合观测. 因 X 射线流量低, 太阳活动剧烈, 扣除背景后的光子数较少, 未能得到高信噪比的偏振分析结果. 其偏振测量结果主要集中在 4~5 keV 能段, 其  $PD = 31.6\% \pm 10.5\%$ ,  $PA = -17.6^\circ_{-15.0}^{+15.5}$ ; 同时也给出了在 2~4 keV 和 5~8 keV 内偏振度上限分别为 24% 和 55% (置信水平均为 99%)<sup>[47]</sup>. 上述结果可以用来自中子星凝聚表面的热辐射在磁层经历 RCS 进行解释, 与 4U 0142+61 偏振观测结果的解释类似<sup>[45,47]</sup>. 在 SGR 1806-20 未来更高偏振精度的观测中, 如果随能量演化的偏振角也存在 90° 的摆动, 那么该源与 4U 0142+61 的偏振性质更加相似.

### 3.4 1E 2259+586

RXTE 自 1996 年起, 就对 1E 2259+586 进行持续监测, 该天体的能谱和光变非常稳定, 并在 2002

年进入了一个爆发活跃期<sup>[78]</sup>. 该磁陀星的自转演化表现出反周期跃变现象, 并且伴随着多次 X 射线辐射变化以及自转减慢速率的显著变化, 这种行为并未被当时的中子星自转减慢的模型所预测, 所以引发了对模型的讨论<sup>[79]</sup>.

IXPE 望远镜在 2023 年 6 月 2—19 日和 6 月 30 日至 7 月 6 日对 1E 2259+5861 进行了总计  $1.2 \times 10^6$  s 的观测. Heyl 等<sup>[48]</sup>利用 IXPE, NICER 和 XMM-Newton 对 1E 2259+586 的联合观测数据, 发现其脉冲轮廓呈现双峰结构, 并且除了次峰以外, 所有相位的偏振度都不低于 20%. 该源的偏振度在计数率最低的相位区间反而偏振度最高, 这个相位正是之前的研究中发现回旋吸收线的相位<sup>[80]</sup>. 同时在十多年的宁静态期间, 该特征没有变化. 在 2002 年的活跃期间, 虽然能谱特征仍然存在, 但其能量随相位变化的位置已经改变<sup>[80]</sup>. 2019 年 Pizzocaro 等<sup>[80]</sup>在 XMM-Newton 对 1E 2259+586 观测的数据中发现, 其 X 射线能谱在 0.7 keV 能量处具有宽吸收特征的证据 (对于 2023 年的联合观测, EPIC-pn 和 IXPE 的数据在添加一个吸收线成分后, 拟合都有了显著改善<sup>[48]</sup>), 不过 Pizzocaro 等<sup>[80]</sup>也指出, 如果用其他成分替换回旋吸收线成分, 能谱的拟合也能得到不错的结果. 如果这个特征是回旋吸收线, 则可能是靠近磁陀星表面的质子的共振散射和吸收导致的. Pizzocaro 等还认为 1E 2259+586 的能谱随相位的演化可以归因于连续谱在全局扭曲偶极磁场中的 RCS 作用, 这种解释与观测数据吻合, 并且与 RCS 模型的预测一致.

Heyl 等<sup>[48]</sup>按照不同特征将 1E 2259+586 的脉冲轮廓研究划分为 5 个相位区间. 如图 5 所示<sup>[48]</sup>, 这 5 个相位区间分别是大凹陷 (Big dip), 上升 (Rise), 主峰 (Big peak), 小凹陷 (Little dip), 以及次峰 (Little peak). Heyl 等进行了整体和随能量变化的偏振分析, 其中在 2~8 keV 的偏振度为  $5.6\% \pm 1.4\%$ , 偏振角为  $-75.2^\circ \pm 7.4^\circ$ . 随后将 2~8 keV 能段分成 3 个区间, 其中只有 2.0~3.2 keV 能段的偏振度超过了  $MDP_{99}$  (置信水平为 99% 的最小可测偏振度), 在  $1\sigma$  的误差下  $PD = 6.1\% \pm 1.5\%$  ( $MDP_{99} = 4.6\%$ ),  $PA = -66.4^\circ \pm 7.1^\circ$ . 在其余的两个区间只能得出偏振度的上限, 在  $3\sigma$  的置信水平下, 3.2~5.0 keV 能段的偏振度上限为  $PD < 14.6\%$ , 5.0~8.0 keV 能段的偏振度上限为  $PD < 70.0\%$ . 在 Peng 等<sup>[81]</sup>利用 IXPE

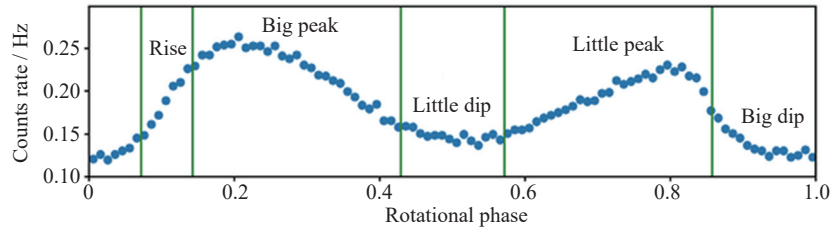


图 5 1E 2259+586 的计数率随相位演化. 不同相位的区域划分及命名与文献 [48] 一致

Fig. 5 Count rate of 1E 2259+586 evolves with the phase. The division and naming of the phase analysis region are consistent with those in Ref. [48]

以及 NICER 数据的联合分析中,也得到了在  $2\sim 8$  keV 的  $PD = 5.3\% \pm 1.3\%$  和  $PA = -77^\circ \pm 7^\circ$  的类似结果,并且偏振角的演化可以由旋转矢量模型描述,这与 Heyl 等 [48] 的分析结果一致,实现了有力的相互验证. 为了研究偏振随脉冲相位的演化, Heyl 等 [48] 将计数分成 14 个等间距的相位区间,并得到这些区间的 PD 以及 PA, 此外他们还研究了有模式变换和无模式变换的旋转矢量模型,结果表明两个模型都可以很好地拟合数据.

根据 Heyl 等 [48] 的解释,磁陀星表面的等离子体环可以充当一种屏障,在某些脉冲相位处,阻挡了部分来自磁陀星表面的辐射;在特定相位区间,辐射可以穿过等离子体环到达观测者. 这种屏障效应在脉冲轮廓图中也有所体现,导致光变曲线的下降,其中 Big Dip 相位可能是这种屏障效应最显著的时期. 之后,随着磁陀星的转动,磁陀星与等离子体环的相对位置发生变化,有更多的光子传播到外面. 由于散射时偏振模式更倾向于从寻常光变换为非寻常光,所以当处在环朝向观测者的相位区间时,主要观测到的是寻常光的偏振;而处在环可见且不遮挡辐射区域的相位区间时,因为散射光子占主导地位,所以主要观测到非寻常光的偏振 [48]. 简单来说,等离子体环引起的散射作用可能会导致偏振模式的改变,所以在特定相位下存在偏振变化. 尽管 1E 2259+586 能谱中吸收特征的证据不如 SGR 0418+5729 明显,但观测到偏振性质随相位的显著变化进一步支持了存在局部高磁场环的想法 [80,82].

## 4 结论与展望

截至目前, IXPE 望远镜已经在轨运行了两年多,其产生的观测数据可以推动相关领域的研究. 在 4U

0142+61 的偏振结果中所显示的偏振角  $90^\circ$  摆动,无论是从强调磁层中 RCS 作用的观点出发,还是从强调 QED 效应和模式变换的观点出发,都提供了对 4U 0142+61 表面和周围磁层物理环境的独特见解. 这两种解释虽然出发点不同,但都指向了磁陀星强磁场会对其辐射的 X 射线偏振特性产生显著影响. 1RXS J1708 的偏振模式与 4U 0142+61 不同,表明两颗磁陀星的热辐射起源可能存在差异,这种差异引发了关于磁陀星表面是凝聚物质还是大气成分的深入讨论. 在 1E 2259+586 的相位分析中暗示的等离子体环现象则为揭示磁陀星磁场的复杂拓扑结构提供了宝贵的线索. 偏振观测作为一种全新的观测手段,极大地增强了对磁陀星辐射模型的理解. 这些发现不仅加深了对磁陀星现象的认识,而且为未来的研究提供了新的方向和重要的科学信息.

目前,虽然对于磁陀星辐射机制、磁场结构、磁层演化以及内部物态方程等仍有许多未完全理解的地方,但是随着对更多磁陀星的观测,对这些问题的理解会越来越明朗. 在未来,相比 IXPE 拥有更强集光能力的增强型 X 射线时变与偏振空间天文台 (enhanced X-ray Timing and Polarimetry, eXTP) 将会在这方面提供重大的贡献 [83]. eXTP 在磁陀星研究领域具备独特的优势,其能够对磁陀星的爆发以及自转演化行为进行深入研究,包括分析周期跃变和进动等现象. 优越的性能指标使得 eXTP 可以进行更精确的偏振测量和能谱分析,例如 eXTP 的高灵敏度将使其能够更清晰地分辨磁陀星在不同脉冲相位下的 X 射线能谱,尤其是那些表现出明显相位依赖性的能谱线,从而能够更好地研究磁陀星附近的磁场强度和拓扑结构,推进对磁陀星的磁场复杂性以及高能辐射机制的认识 [84].

随着探测技术的发展,天文观测将实现更宽的能

段覆盖、更高的空间分辨率和时间分辨率。这些先进技术将提供更全面的视野、更准确的判断来揭开磁陀星的神秘面纱,了解其背后的物理机制。

## 参考文献

- [1] KIM C M, KIM S P. Magnetars as laboratories for strong field QED[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2024, **2874**(1): 020013
- [2] KASPI V M, BELOBORODOV A M. Magnetars[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2017, **55**: 261-301
- [3] HURLEY K. Soft gamma repeaters[J]. *Advances in Space Research*, 2011, **47**(8): 1326-1331
- [4] VAN PARADIJS J, TAAM R E, VAN DEN HEUVEL E P J. On the nature of the 'anomalous' 6-s X-ray pulsars[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1995, **299**: L41
- [5] WU Xinji, QIAO Guojun, XU Renxin. Pulsar Physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2018 (吴鑫基, 乔国俊, 徐仁新. 脉冲星物理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2018)
- [6] LEWIN W, VAN DER KLIS M. Compact Stellar X-Ray Sources[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006
- [7] THOMPSON C, DUNCAN R C. The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars. II. quiescent neutrino, X-ray, and Alfvén wave emission[J]. *The Astrophysical Journal*, 1996, **473**(1): 322-342
- [8] OLAUSEN S A, KASPI V M. The McGill magnetar catalog[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2014, **212**(1): 6
- [9] GROUP M P. McGill online magnetar catalog[EB/OL]. (2020-11-17)[2024-10-25]. <https://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>
- [10] DIB R, KASPI V M. 16 yr of *RXTE* monitoring of five anomalous X-ray pulsars[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **784**(1): 37
- [11] GÜVER T, GÖĞÜŞ E, ÖZEL F. A magnetar strength surface magnetic field for the slowly spinning down SGR 0418+5729[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, **418**(4): 2773-2778
- [12] KUMAR H S, SAFI-HARB S. Variability of the high magnetic field X-Ray pulsar PSR J1846-0258 associated with the supernova remnant Kes 75 as revealed by the Chandra X-Ray Observatory[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, **678**(1): L43-L46
- [13] KUIPER L, HERMSEN W. High-energy characteristics of the schizophrenic pulsar PSR J1846-0258 in Kes 75. Multi-year *RXTE* and *INTEGRAL* observations crossing the magnetar-like outburst[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2009, **501**(3): 1031-1046
- [14] ARCHIBALD R F, KASPI V M, TENDULKAR S P, *et al.* A magnetar-like outburst from a high-B radio pulsar[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, **829**(1): L21
- [15] BOCHENEK C D, RAVI V, BELOV K V, *et al.* A fast radio burst associated with a Galactic magnetar[J]. *Nature*, 2020, **587**(7832): 59-62
- [16] The CHIME/FRB Collaboration. A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar[J]. *Nature*, 2020, **587**(7832): 54-58
- [17] LI C K, LIN L, XIONG S L, *et al.* HXMT identification of a non-thermal X-ray burst from SGR J1935+2154 and with FRB 200428[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**(4): 378-384
- [18] MEREGHETTI S, SAVCHENKO V, FERRIGNO C, *et al.* *INTEGRAL* discovery of a burst with associated radio emission from the magnetar SGR 1935+2154[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, **898**(2): L29
- [19] RIDNAIA A, SVINKIN D, FREDERIKS D, *et al.* A peculiar hard X-ray counterpart of a Galactic fast radio burst[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**(4): 372-377
- [20] TAVANI M, CASENTINI C, URSI A, *et al.* An X-ray burst from a magnetar enlightening the mechanism of fast radio bursts[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**(4): 401-407
- [21] ZHONG S Q, DAI Z G, ZHANG H M, *et al.* On the Distance of SGR 1935+2154 Associated with FRB 200428 and Hosted in SNR G57.2+0.8[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, **898**(1): L5
- [22] The CHIME/FRB Collaboration, ANDERSEN B C, BANDURA K, *et al.* Sub-second periodicity in a fast radio burst[J]. *Nature*, 2022, **607**(7918): 256-259
- [23] PELLICCIARI D, BERNARDI G, PILIA M, *et al.* The Northern Cross Fast Radio Burst project. III. The FRB-magnetar connection in a sample of nearby galaxies[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2023, **674**: A223
- [24] HU C P, NARITA T, ENOTO T, *et al.* Rapid spin changes around a magnetar fast radio burst[J]. *Nature*, 2024, **626**(7999): 500-504
- [25] DESVIGNES G, WELTEVREDE P, GAO Y, *et al.* A freely precessing magnetar following an X-ray outburst[J]. *Nature Astronomy*, 2024, **8**(5): 617-627
- [26] HARDING A K, LAI D. Physics of strongly magnetized neutron stars[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2006, **69**(9): 2631-2708
- [27] LAI D, HO W C G. Polarized X-ray emission from magnetized neutron stars: signature of strong-field vacuum polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2003, **91**(7): 071101
- [28] TAVERNA R, TUROLLA R. X-ray polarization from magnetar sources[J]. *Galaxies*, 2024, **12**(1): 6
- [29] DEININGER W D, KALINOWSKI W, MASCIARELLI J, *et al.* IXPE mission system concept and development status[C]//2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2019: 1-15
- [30] WEISSKOPF M C, SOFFITTA P, BALDINI L, *et al.* The imaging X-ray polarimetry explorer (IXPE): pre-launch[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2022, **8**(2): 026002
- [31] SOFFITTA P, BALDINI L, BELLAZZINI R, *et al.* The in-

- strument of the imaging x-ray polarimetry explorer[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, **162**(5): 208
- [32] BALDINI L, BARBANERA M, BELLAZZINI R, *et al.* Design, construction, and test of the Gas Pixel Detectors for the IXPE mission[J]. *Astroparticle Physics*, 2021, **133**: 102628
- [33] MULERI F. Analysis of the data from photoelectric gas polarimeters[M]//BAMBI C, SANTANGELO A. Handbook of X-Ray and Gamma-Ray Astrophysics. Singapore: Springer, 2022: 1-23
- [34] XIE F, DI MARCO A, LA MONACA F, *et al.* Vela pulsar wind nebula X-rays are polarized to near the synchrotron limit[J]. *Nature*, 2022, **612**(7941): 658-660
- [35] MARIN F, CHURAZOV E, KHABIBULLIN I, *et al.* X-ray polarization evidence for a 200-year-old flare of Sgr A[J]. *Nature*, 2023, **619**(7968): 41-45
- [36] LIODAKIS I, MARSCHER A P, AGUDO I, *et al.* Polarized blazar X-rays imply particle acceleration in shocks[J]. *Nature*, 2022, **611**(7937): 677-681
- [37] DOROSHENKO V, POUTANEN J, TSYGANKOV S S, *et al.* Determination of X-ray pulsar geometry with IXPE polarimetry[J]. *Nature Astronomy*, 2022, **6**(12): 1433-1443
- [38] KRAWCZYNSKI H, MULERI F, DOVČIAK M, *et al.* Polarized X-rays constrain the disk-jet geometry in the black hole X-ray binary Cygnus X-1[J]. *Science*, 2022, **378**(6620): 650-654
- [39] MARRA L, BRIGITTE M, RODRIGUEZ CAVERO N, *et al.* IXPE observation confirms a high spin in the accreting black hole 4U 1957+115[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2024, **684**: A95
- [40] VELEDINA A, MULERI F, POUTANEN J, *et al.* Cygnus X-3 revealed as a Galactic ultraluminous X-ray source by IXPE[J]. *Nature Astronomy*, 2024, **8**: 1031-1046
- [41] LI Hong. Study and Development of the Technique and Detector for Astronomical X-Ray Polarimetry Based on Photoelectric Effect[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016 (李红. 基于光电效应的天文 X 射线偏振测量方法及仪器研究 [D]. 北京: 清华大学, 2016)
- [42] COSTA E, SOFFITTA P, BELLAZZINI R, *et al.* An efficient photoelectric X-ray polarimeter for the study of black holes and neutron stars[J]. *Nature*, 2001, **411**(6838): 662-665
- [43] LA MONACA F, XIE F, SOFFITTA P, *et al.* A possibility to extend the IXPE energy band[C]//Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray. Montréal: SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2022: 121811D
- [44] GONZÁLEZ CANIULEF D, ZANE S, TAVERNA R, *et al.* Polarized thermal emission from X-ray dim isolated neutron stars: the case of RX J1856.5-3754[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, **459**(4): 3585-3595
- [45] TAVERNA R, TUROLLA R, MULERI F, *et al.* Polarized X-rays from a magnetar[J]. *Science*, 2022, **378**(6620): 646-650
- [46] ZANE S, TAVERNA R, GONZÁLEZ-CANIULEF D, *et al.* A strong X-ray polarization signal from the magnetar 1RXS J170849.0-400910[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, **944**(2): L27
- [47] TUROLLA R, TAVERNA R, ISRAEL G L, *et al.* IXPE and XMM-Newton observations of the soft gamma repeater SGR 1806-20[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **954**(1): 88
- [48] HEYL J, TAVERNA R, TUROLLA R, *et al.* The detection of polarized X-ray emission from the magnetar 1E 2259+586[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, **527**(4): 12219-12231
- [49] TAVERNA R, MULERI F, TUROLLA R, *et al.* Probing magnetar magnetosphere through X-ray polarization measurements[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, **438**(2): 1686-1697
- [50] HEYL J S, SHAVIV N J. QED and the high polarization of the thermal radiation from neutron stars[J]. *Physical Review D*, 2002, **66**(2): 023002
- [51] RADHAKRISHNAN V, COOKE D J. Magnetic poles and the polarization structure of pulsar radiation[J]. *Astrophysical Letters*, 1969, **3**: 225-229
- [52] THOMPSON C, LYUTIKOV M, KULKARNI S R. Electrodynamics of magnetars: implications for the persistent X-ray emission and spin-down of the soft gamma repeaters and anomalous X-ray pulsars[J]. *The Astrophysical Journal*, 2002, **574**(1): 332-355
- [53] TONG H, WANG P F, WANG H G, *et al.* Rotating vector model for magnetars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, **502**(1): 1549-1556
- [54] TONG H. Large polar caps for twisted magnetosphere of magnetars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, **489**(3): 3769-3777
- [55] SCHWARM F W, BALLHAUSEN R, FALKNER S, *et al.* Cyclotron resonant scattering feature simulations II. Description of the CRSF simulation process[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, **601**: A99
- [56] FOMIN P I, KHOLODOV R I. Resonance Compton scattering in an external magnetic field[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2000, **90**(2): 281-286
- [57] REA N, ZANE S, TUROLLA R, *et al.* Resonant cyclotron scattering in Magnetars' emission[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, **686**(2): 1245-1260
- [58] CAIAZZO I, GONZÁLEZ-CANIULEF D, HEYL J, *et al.* Probing magnetar emission mechanisms with X-ray spectropolarimetry[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, **514**(4): 5024-5034
- [59] MÉSZÁROS P. High-Energy Radiation from Magnetized Neutron Stars[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1992
- [60] TAVERNA R, TUROLLA R, ZANE S, *et al.* Polarized emission from strongly magnetized sources[J]. *Proceedings*

- of the *International Astronomical Union*, 2020, **16**(S363): 276-279
- [61] LAI D, HO W C G. Resonant conversion of photon modes due to vacuum polarization in a magnetized plasma: implications for X-ray emission from magnetars[J]. *The Astrophysical Journal*, 2002, **566**(1): 373-377
- [62] LAI D. IXPE detection of polarized X-rays from magnetars and photon mode conversion at QED vacuum resonance[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2023, **120**(17): e2216534120
- [63] KELLY R M E, ZANE S, TUROLLO R, *et al.* X-ray polarization in magnetar atmospheres – effects of mode conversion[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, **528**(3): 3927-3940
- [64] WANG Z X, CHAKRABARTY D, KAPLAN D L. A debris disk around an isolated young neutron star[J]. *Nature*, 2006, **440**(7085): 772-775
- [65] ERTAN Ü, ERKUT M H, EKŞİ K Y, *et al.* The anomalous X-ray pulsar 4U 0142+61: a neutron star with a gaseous fallback disk[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, **657**(1): 441
- [66] TONG H, WANG W, LIU X W, *et al.* Rotational evolution of magnetars in the presence of a fallback disk[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **833**(2): 265
- [67] GRIMANI C. Clues from 4U 0142+61 on supernova fallback disc formation and precession[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, **507**(1): 261-266
- [68] KASPI V M, LACKEY J R, CHAKRABARTY D. A glitch in an anomalous X-ray pulsar[J]. *The Astrophysical Journal*, 2000, **537**(1): L31-L34
- [69] DALL'OSSO S, ISRAEL G L, STELLA L, *et al.* The glitches of the anomalous X-ray pulsar 1RXS J170849.0-400910[J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, **599**(1): 485-497
- [70] SCHOLZ P, ARCHIBALD R F, KASPI V M, *et al.* On the X-ray variability of magnetar 1RXS J170849.0-400910[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **783**(2): 99
- [71] VAN ADELBERG M, PERNA R. Soft X-ray polarization in thermal magnetar emission[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, **399**(3): 1523-1533
- [72] WOODS P M, KOUVELIOTOU C, FINGER M H, *et al.* The prelude to and aftermath of the giant flare of 2004 December 27: persistent and pulsed X-ray properties of SGR 1806-20 from 1993 to 2005[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, **654**(1): 470-486
- [73] HURLEY K, BOGGS S E, SMITH D M, *et al.* An exceptionally bright flare from SGR 1806-20 and the origins of short-duration  $\gamma$ -ray bursts[J]. *Nature*, 2005, **434**(7037): 1098-1103
- [74] FEROCI M, FRONTERA F, COSTA E, *et al.* A giant outburst from SGR 1900+14 observed with the *BeppoSAX* Gamma-ray burst monitor[J]. *The Astrophysical Journal*, 1999, **515**(1): L9-L12
- [75] MAZETS E P, GOLENETSKII S V, IL'INSKII V N, *et al.* Observations of a flaring X-ray pulsar in Dorado[J]. *Nature*, 1979, **282**(5739): 587-589
- [76] CHAND V, JOSHI J C, GUPTA R, *et al.* Magnetar giant flare originating from GRB 200415A: transient GeV emission, time-resolved  $E_p$ - $L_{\text{iso}}$  correlation and implications[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, **21**(9): 236
- [77] MINAEV P Y, POZANENKO A S, GREBENEV S A, *et al.* GRB 231115A—a magnetar giant flare in the M82 galaxy[J]. *Astronomy Letters*, 2024, **50**(1): 1-24
- [78] KASPI V M, GAVRIIL F P, WOODS P M, *et al.* A major soft gamma repeater-like outburst and rotation glitch in the no-longer-so-anomalous X-ray pulsar 1E 2259+586[J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, **588**(2): L93-L96
- [79] ARCHIBALD R F, KASPI V M, NG C Y, *et al.* An anti-glitch in a magnetar[J]. *Nature*, 2013, **497**(7451): 591-593
- [80] PIZZOCARO D, TIENGO A, MEREGHETTI S, *et al.* De-tailed X-ray spectroscopy of the magnetar 1E 2259+586[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2019, **626**: A39
- [81] PENG H L, GE M Y, WENG S S, *et al.* Polarized X-rays detected from the anomalous X-ray pulsar 1E 2259+586[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **961**(1): 106
- [82] TIENGO A, ESPOSITO P, MEREGHETTI S, *et al.* A variable absorption feature in the X-ray spectrum of a magnetar[J]. *Nature*, 2013, **500**(7462): 312-314
- [83] ZHANG S N, SANTANGELO A, FEROCI M, *et al.* The enhanced X-ray Timing and Polarimetry mission—eXTP[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, **62**(2): 29502
- [84] SANTANGELO A, ZANE S, FENG H, *et al.* Physics and astrophysics of strong magnetic field systems with eXTP[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, **62**(2): 29505

## 作者简介



陈伟男, 2000年9月出生于广西  
壮族自治区北海市, 现为广西大学物理科学  
与工程技术学院研究生。主要研究方向为  
X射线天体物理研究。  
E-mail: chenwgxu@st.gxu.edu.cn



谢斐(通信作者)女, 1989年  
11月出生于江西省宜春市, 现为广西大学  
物理科学与工程技术学院教授, 博士生导师,  
主要研究方向为X射线偏振探测技术和X  
射线天体物理研究。  
E-mail: xief@gxu.edu.cn