

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.03.03

磁星的观测特性和理论模型

姚广瑞^{1,2}, 闫 振^{1,4}, 黄 磊^{1,4}, 余 聪³, 沈志强^{1,4}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中山大学 物理与天文学院, 广州 519082; 4. 中国科学院 射电天文重点实验室, 上海 200030)

摘要: 磁星 (magnetar) 是一类有着极强磁场的致密天体, 它们的外部磁场强度是典型中子星磁场强度的 100~1 000 倍。在过去几十年中, 软 γ 射线复现源 (SGR) 和反常 X 射线脉冲星 (AXP) 被认为是最有可能的磁星候选者。磁星有着独特的能谱性质和光变特征, 它的观测现象丰富多彩, 其观测波段跨越了射电、红外、光学、X 射线和 γ 射线等。近些年来, 多种理论模型也相继被提出来, 以解释其独特的性质。以正常脉冲星为例, 介绍了磁星与通常中子星的不同性质, 详述了磁星在多波段的能谱、光变及周期跃变现象等观测特性, 总结了为解释磁星的特殊性质而建立起来的多种理论模型, 并详述了中子星框架下的扭曲磁层模型。此外还介绍了其他候选模型。

关键词: 磁星; SGR; AXP; 巨型闪耀; 扭曲磁层模型

中图分类号: P145.6

文献标识码: A

1 引 言

磁星 (magnetar) 是近些年来被广泛关注的一类致密天体, 它们有着极强的外部磁场强度 ($10^8 \sim 10^{11}$ T, 地球表面的磁场强度仅为约 10^{-5} T)。已知磁星的自转周期为 2~12 s, 周期变化率在 $10^{-13} \sim 10^{-10} \text{ s} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内。磁星的典型特征之一是在 X 射线波段和软 γ 射线波段有着能量巨大且经常超爱丁顿光度的短期爆发; 部分磁星甚至会发射出中等闪耀和巨型闪耀, 后者在不到 0.5 s 内能释放出高达 10^{39} J 的能量; 少数磁星 (目前只观测到 4 颗) 有射电波段的辐射。作为中子星的两个子类, 软 γ 射线复现源 (soft gamma repeater, SGR) 和反常 X 射线脉冲星 (anomalous X-ray pulsar, AXP) 被认为是可能性最大的磁星候选者。然而磁星被认证为一类独特天体的过程并非一帆风顺, 作为子类的 SGR 和 AXP 是通过不同的高能辐射特征被独立地发现的。

SGR 是人们对硬 X 射线/软 γ 射线范围内的短期爆发探测中^[1]所发现的。1979 年 1 月

收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-03-26

资助项目: 国家自然科学基金 (11590780, 11590784, 11173046)

通讯作者: 姚广瑞, gryao@shao.ac.cn

7 日,金星号探测器携带的观测设备探测到来自 SGR 1806-20 的持续 0.25 s 的软 γ 射线暴,这是第一次观测到 SGR 现象^[2]。由于其短周期和软谱型的特征,天文学家在当时将该 SGR 归为 γ 射线暴 (gamma-ray burst, GRB) 的一个子类。直到 1983 年人们对 SGR 1806-20 的再度观测,这类有着独特性质的源才引起人们的足够重视。SGR 普遍存在着多重爆发现象 (GRB 没有重复爆发的特点),其高能 γ 射线辐射的不足,以及此类爆发间的相似处,足以使其被视为一类新的天体物理瞬变现象。1979 年 3 月 5 日,人们第一次探测到 SGR 巨型闪耀,这是当时有记录以来最强烈的 SGR 爆发^[3]。该爆发开始于一个极亮的长钉状结构,峰值约为 $10^{38} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[4]。其后 3 min 内伴随着周期为 8 s 的连续脉动,其流量以类指数的形式衰减^[5]。天文学家将此次爆发准确定位于大麦云超新星遗迹 (supernova remnant, SNR) N49 的边缘,并将该源命名为 SGR 0526-66^[6]。该源的高光度、强脉冲及明显与超新星遗迹成协等特征,使得其被认证为一个自转周期为 8 s 的年轻磁星。随着更多 X 射线观测数据的积累和更深程度光学/红外波段的探测,人们排除了其有明亮伴星存在的可能,并最终将 SGR 划归为一种单独类别的中子星^[7],最初的磁星模型也随之建立起来^[8]。

AXP 则最早在软 X 射线范围内 (低于 10 keV) 被探测到,起初被归为吸积双星的类别。最早探测到 AXP 的是 Fahlman 和 Gregory^[9],他们发现了来自位于 SNR CTB 109 中心处的 X 射线源 1E 2259+586 的脉冲。1E 2259+586 开始被解释为一个特殊的 X 射线双星,它的能谱比典型的吸积脉冲星更软,而且没有探测到它的光学对应体。后来人们发现,这个源存在着长期的自转减慢现象,它发射出 X 射线光度所需要的能量比中子星转动引起的动能损失大得多。随后的 15 年内人们又发现了其他几个类似的源, Hellier^[10],以及 Mereghetti 和 Stella^[7] 将目标源 1E 2259+586, 1E 1048.1-5937 和 4U 0142+61 分类为低质量 X 射线双星。这类源具有以下显著性质: (1) 范围很窄的自转周期 (5~9 s); (2) 相当恒定的 X 射线光度 (大致范围为 $10^{28} \sim 10^{29} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$); (3) 没有轨道多普勒频移; (4) 相对软的 X 射线谱型和稳定的自转减慢。1996 年以后,人们又探测到另外 3 个新的 AXP——1RXS J170849.0-400910, 1E 1841-045 和 XTE J1810-197, 以及 2 个候选者——AX J1845-0258 和 CXOU J0110043.1-721134。随后多年的观测结果证实 AXP 与 SGR 有着很多类似的性质^[2],因此,原本为 SGR 建立的磁星模型,也可应用在 AXP 上^[11]。

过去的几十年里,天文学家已相继发现了 29 颗磁星及磁星候选者^[12, 13],其中 15 颗为 SGR (11 颗已证实,4 颗为候选者),14 颗为 AXP (12 颗已证实,2 颗为候选者)。Mereghetti^[14]曾给出过关于 SGR 和 AXP 的介绍。近年来更多观测设备的投入使用,使得观测数据愈加丰富,更多理论模型也相继建立,因此,笔者认为有必要对此予以补充和梳理。本文第 2 章介绍磁星与通常中子星 (主要以正常脉冲星作为对比) 的不同,并以表格的形式给出目前所有已确认的磁星和磁星候选者在多波段的观测数据和主要性质;第 3 章详细介绍磁星的典型观测特征,主要包括磁星的能谱特征、光变特征以及周期跃变现象;第 4 章介绍目前流行的磁星理论模型,主要介绍中子星框架下的扭曲磁层模型和非中子星框架下的其他候选模型。

2 磁星与正常脉冲星性质对比

磁星与一般中子星在很多性质上有着显著区别。正常脉冲星作为一类典型的中子星为人们所熟知。我们以正常脉冲星为例, 详细讨论磁星和一般中子星的典型性质及其差异(见表1和表2)。

(1) 磁星有着独特的自转特征。磁星的自转周期比脉冲星的典型自转周期长: 正常脉冲星的自转周期分布在 $0.033\sim 8.51$ s 之间^[15, 16], 大多数分布在 $0.1\sim 4$ s 之间^[17], 而磁星的自转周期分布在 $2\sim 12$ s 范围内(见表2)。对于磁星和正常脉冲星, 都存在自转周期增加的现象, 通常用周期变化率 \dot{P} 来表征该现象。磁星的周期变化率比正常脉冲星大: 正常脉冲星的典型周期变化率约为 $10^{-15} \text{ s}\cdot\text{s}^{-1}$, 而磁星的典型周期变化率范围为 $10^{-13} \sim 10^{-10} \text{ s}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(2) 根据中子星框架模型, 磁星是一类孤立的中子星。双星系统是中子星观测中的常见现象。目前已知在银河系内及银河系外有数百个吸积供能的中子星, 它们都通过吸积双星系统中伴星的物质作为其能量的来源, 其中典型的有存在着吸积过程的 X 射线双星。在对磁星的光学和近红外深度观测中, 未发现大质量双星系统中常见的明亮对应体^[18]。通过对其 X 射线时标的进一步研究, 排除了低质量双星系统的可能^[19]。由于 AXP/SGR 在光学和红外波段的辐射非常弱, 因此, 可排除其存在标准伴星和吸积盘的可能^[20]。这些发现都预示着磁星是孤立的中子星。另外, 基于吸积供能的假设, 孤立脉冲星吸积所产生的能量并不足以引发观测到的爆发和闪耀。

(3) 磁星的电磁波辐射为磁能提供能量。对于正常的射电脉冲星(迄今已观测到超过 2000 颗), 其脉冲辐射以及脉冲星风云需要的能量由脉冲星转动动能提供, 然而该波段释放的能量只占其转动动能损失的很小一部分。X 射线波段的效率更高一些, 非热辐射在大约 100 个正常脉冲星中被发现, 平均效率约为 10^{-3} ^[21, 22]。在 γ 射线波段, 对于中等年龄的正常脉冲星, 效率接近 100%^[20]。然而磁星的转动动能损失仅约 $10^{25} \sim 10^{27} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$, 不足以为其光度提供能量, 而磁能供能的方案能够解决这一问题。磁星的外部磁场强度通常高达 $10^8 \sim 10^{11} \text{ T}$, 是正常脉冲星的典型磁场强度的 $100\sim 1000$ 倍。对于磁场强度为 $B = 10^{11} \text{ T}$ 的中子星, 其总能量为 $3 \times 10^{40} B^2 \text{ J}$, 这足以以为光度为 $10^{28} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中子星辐射提供能量长达 10^5 a 。目前有多种证据表明, AXP/SGR 中存在强磁场。我们将在第 4 章对此进行详细讨论。

表 1 和表 2 分别列出目前所有已确认的磁星和磁星候选者的多波段观测数据和主要性质。它们的具体观测性质将在第 3 章进行详细的介绍。

3 磁星的观测特性

磁星的典型特征主要集中在 X 射线能量范围, 目前已确认的磁星都有集中在软 X 射线波段(小于 10 keV)的脉冲现象, 很多磁星的脉冲现象也在高达 $100\sim 200$ keV 的硬 X 射线波段被探测到。磁星最显著的特征是它独特的光变现象。该现象从软 γ 射线的短期爆发到极端高能巨型闪耀, 跨越了极大的时标和光度范围。另外, 磁星的到达时间特征, 特别是一类特殊的反向周期跃变(anti-glitch)现象, 也引人瞩目。

表 1 AXP 和 SGR 的多波段观测^[13, 20]

类别	磁星及磁星候选者	赤经 (J2000)	赤纬 (J2000)	X 射线波段 (> 10 keV)	光学 (< 10 keV)	近红外 波段	中红外 波段	射电 波段	距离 /kpc	氢柱密度 /10 ²¹ cm ⁻²	参考 文献
	CXOU J0100-7211	01h00min43.14s	-72°11'33.8"	—	P	—	—	—	61	0.6	[23, 24]
	4U 0142+61	01h46min22.407s	+61°45'03.19"	P	P	D	D	—	3.6	5	[7, 25]
	1E 1048.1-5937	10h50min07.14s	-59°53'21.4"	D?	P	D	—	—	9	6	[26, 27]
	1E 1547.0-5408	15h50min54.12386s	-54°18'24.1141"	P	P, T	D	—	P	5	50	[7, 28]
	CXOU J1647-4552	16h47min10.20s	-45°52'16.90"	—	P, T	—	—	—	3.9	13	[29, 30]
	1RXS J1708-4009	17h08min46.87s	-40°08'52.44"	P	P	D?	—	—	3.8	14	[31, 32]
	CXOU J1714-3810	17h14min05.74s	-38°10'30.9"	—	P	—	—	—	13.2	25	[33, 34]
AXP	XTE J1810-197	18h09min51.08696s	-19°43'51.9315"	—	P, T	D	—	P	3.1	6	[35, 36]
	Swift J1822-1606	18h22min18.00s	-16°04'26.8"	—	P, T	—	—	—	5	2	[37-39]
	Swift J1834-0846	18h34min52.118s	-08°45'56.02"	—	P, T	—	—	—	5	1.3	[40, 41]
	1E 1841-045	18h41min19.343s	-04°56'11.16"	P	P	D?	—	—	8.5	23	[42, 43]
	1E 2259+586	23h01min08.295s	+58°52'44.45"	—	P	D	D	—	3.2	10	[44, 45]
	AX J1818.8-1559 [†]	18h18min51.38s	-15°59'22.62"	—	—	—	—	—	—	36	[46]
	AX J1845.0-0258 [†]	18h44min54.68s	-02°56'53.1"	—	D	—	—	—	8.5	78	[47, 48]
	SGR 0418+5729	04h18min33.867s	+57°32'22.91"	—	P, T	—	—	—	2	1.1	[49, 50]
	SGR 0501+4516	05h01min06.76s	+45°16'33.92"	P	P, T	P	—	T	1.5	9	[51, 52]
	SGR 0526-66	05h26min00.89s	-66°04'36.3"	—	P	—	—	—	55	5	[53]
	PSR J1622-4950	16h22min44.89s	-49°50'52.7"	—	D, T	—	—	P	9	50	[54, 55]
	SGR 1627-41	16h35min51.844s	-47°35'23.31"	—	P, T	—	—	—	11	90	[56, 57]
	SGR 1745-2900	17h45min40.164s	-29°00'29.818"	D	D	—	—	P	8.3	—	[58, 59]
	SGR 1806-20	18h08min39.337s	-20°24'39.85"	D	P	D	—	T	10	60	[60, 61]
SGR	SGR 1833-0832	18h33min44.37s	-08°31'07.5"	—	P, T	—	—	—	10	100	[62, 63]
	3XMM J1852+0033	18h52min46.67s	+00°33'17.8"	—	P, T	—	—	—	7.1	—	[64]
	SGR 1900+14	19h07min14.33s	+09°19'20.1"	D	P	D?	—	T	15	20	[43, 65]
	SGR 1935+2154	19h34min55.5978s	+21°53'47.7864"	—	D	—	—	—	—	16	[66]
	SGR 0755-2933 [†]	07h55min42.48s	-29°33'49.2"	—	D	—	—	—	—	—	[67]
	SGR 1801-23 [†]	18h00min59s	-22°56'48"	—	—	—	—	—	—	—	[68]
	SGR 1808-20 [†]	18h08min11.2s	-20°38'49"	—	—	—	—	—	—	—	[69]
	SGR 2013+34 [†]	20h13min56.9s	+34°19'48"	—	—	—	—	—	8.8	—	[70]

注: 第 2 列中标有 † 号者为磁星候选者^[13]; 第 5—10 列中, P 代表脉冲, D 代表探测到, D? 代表可能探测到, T 代表暂现。

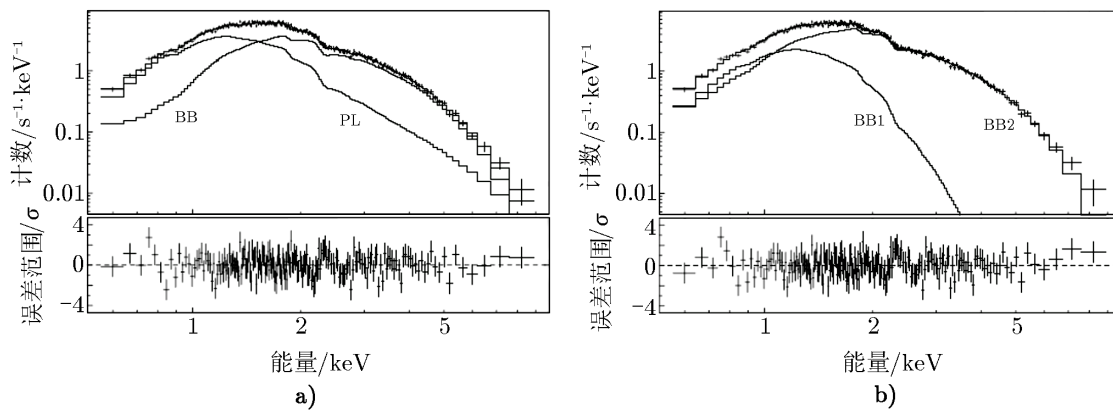
表 2 AXP 和 SGR 的主要性质^[13, 20]

类别	磁星及磁星候选者	周期 /s	周期变化率 $/10^{-11} \text{s} \cdot \text{s}^{-1}$	磁场强度 $/10^{10} \text{T}$	2~10 keV 范围内的 X 射线流量 $/10^{-18} \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	2~10 keV 范围内的 X 射线光度 $/10^{26} \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$	光变 现象	参考 文献	
AXP	CXOU J0100-7211	8.02	1.9	4	0.013	65	—	[23, 24, 71]	
	4U 0142+61	8.69	0.2	1.3	6~7	105	B, G?	[72, 73]	
	1E 1048.1-5937	6.45	1~10	2.6~8.1	0.5~4	49	B, G	[74, 75]	
	1E 1547.0-5408	2.07	2.3	2.2	0.03~9	1.3	B, G	[76, 77]	
	CXOU J1647-4552	10.6	<0.04	<0.7	0.01~4	0.45	B, G?	[78, 79]	
	1RXS J1708-4009	11.0	2.4	5.2	2~3	42	G	[80, 81]	
	CXOU J1714-3810	3.82	6.4	5	0.14	56	—	[33, 82]	
	XTE J1810-197	5.54	0.8~2.2	2.1~3.5	0.05~8	0.043	B	[36, 83]	
	Swift J1822-1606	8.44	0.03	0.5	0.008~25	<0.000 40	B	[38, 39]	
	Swift J1834-0846	2.48	0.8	1.4	<0.000 4~3	<0.008 4~1	B	[40, 41]	
	1E 1841-045	11.77	4.1	7	1.6	184	B, G	[81, 84]	
	1E 2259+586	6.98	0.048	0.6	1~4	17	B, G	[85, 86]	
	AX J1818.8-1559 [†]	—	—	—	0.168	—	B	[46]	
	AX J1845.0-0258 [†]	6.97	—	—	0.033	2.9	—	[47, 48]	
	SGR	SGR 0418+5729	9.1	0.000 4	0.06	0.002~3	0.000 96	B	[49, 87]
		SGR 0501+4516	5.7	0.7	2	0.13~4	0.81	B	[88, 89]
		SGR 0526-66	8.05	4	5.7	0.05	189	F, B	[3]
PSR J1622-4950		4.33	1.7	2.7	0.003~0.14	0.44	—	[54]	
SGR 1627-41		2.59	1.9	2.2	0.006~1.2	3.6	B	[56, 90]	
SGR 1745-2900		3.76	1.4	2.3	<0.13	<0.11	F, B	[91, 92]	
SGR 1806-20		7.6	8~80	8~25	1~3	163	F, B	[93, 94]	
SGR 1833-0832		7.56	0.28	1.5	<0.004~0.4	—	B	[62, 63]	
3XMM J1852+0033		11.56	<0.014	<0.41	<0.01	<0.006 0	—	[95]	
SGR 1900+14		5.2	5~14	5.1~8.6	0.4~1	90	F, B, G?	[96]	
SGR 1935+2154		3.25	1.43	2.2	—	—	B	[66]	
SGR 0755-2933 [†]		—	—	—	—	—	B	[67]	
SGR 1801-23 [†]		—	—	—	—	—	B	[68]	
SGR 1808-20 [†]		—	—	—	—	—	B	[69]	
SGR 2013+34 [†]		—	—	—	—	—	B	[70]	

注: 第 2 列中, 标有 † 号者为磁星候选者; 第 8 列中, F 代表观测到巨型闪耀, B 代表观测到短期爆发, G 代表观测到周期跃变, G? 代表观测到可能的周期跃变。

3.1 磁星的能谱特征

磁星通常有着持续的 X 射线辐射, 其 X 射线的强流量持续辐射在 AXP 和 SGR 中都被探测到。磁星在低于 10 keV 能量范围内 (即软 X 射线波段) 通常有软的能谱。该能谱一般可用一个光指数为 2~4 的幂律谱与一个黑体谱的叠加来拟合, 有些 AXP 的能谱也可以用两个黑体谱拟合^[14]。图 1 给出了 XMM-Newton 卫星的欧洲光子摄像机 (European Photon Imaging Camera, EPIC) 观测到的 XTE J1810-197 的 X 射线能谱^[97]。在硬 X 射线波段, 部分磁星能谱有着幂律谱的尾部结构, 且通常能够延伸到 100~200 keV。部分硬 X 射线辐射的光度与其低于 10 keV 的光度相似^[98], 且多个磁星在一直到 150 keV 的能量范围内都被探测到巨大的脉冲成分。这种脉冲型尾部结构通常会随时间变化, 且其光度为总光度的很重要的一部分。在 10~200 keV 能量范围内幂律谱模型拟合给出的光子指数 Γ 在 1~2 之间^[99]。在兆电子伏区域得到的流量上限表明, 幂律谱的形式不再适用于更高的能量范围^[100]。硬 X 射线辐射也在暂现磁星中被观测到^[91]。



注: a) 幂律谱和黑体谱叠加的模型拟合; b) 两个黑体谱叠加的模型拟合。图中 BB 代表黑体谱, PL 代表幂律谱。

图 1 XMM-Newton 卫星的 EPIC 观测到的 XTE J1810-197 的 X 射线能谱^[97]

大多数磁星没有在射电波段被探测到。在目前已证实的 23 颗磁星中, 只有 4 颗有持续的射电辐射, 分别是 XTE 1810-197, 1E 1547-5408, PSR J1622-4950 和最新发现的银河系中心方向的 SGR J1745-2900。在银河系中心附近找到脉冲星一直是射电天文学家的目标, 即使是紧密围绕黑洞转动的孤立脉冲星, 都可能对广义相对论精密验证有意义。但是, 受到散射影响, 想要在银河系中心搜寻脉冲星, 必须在高射电频率下进行。2013 年, 在人马座 A* 方向发现的磁星 SGR J1745-2900 引起了广泛关注。此后, 人们通过单天线望远镜对该磁星进行了射电波段观测。2014 年 6—10 月间, 我们利用上海天马射电望远镜^[101], 在 8.6 GHz 频率下对 PSR J1745-2900 进行了 6 个历元的观测, 结果如图 2 所示。可以看出, 不同历元间流量密度和积分轮廓都有显著变化。在修正儒略日 (modified Julian day, MJD) 56 836, 磁星的流量密度为 8.7 mJy, 其辐射由长钉状脉冲主导, 随后伴随着对数正态分布的峰值流量密度。此外, 我们发现, 在 1 913 个脉冲中, 有 53 个脉冲的峰值流量密度比平均轮廓高 10 倍。

根据对磁星的光学和近红外波段的观测研究, 目前已探测到 3 颗有光学脉动的磁星^[98],

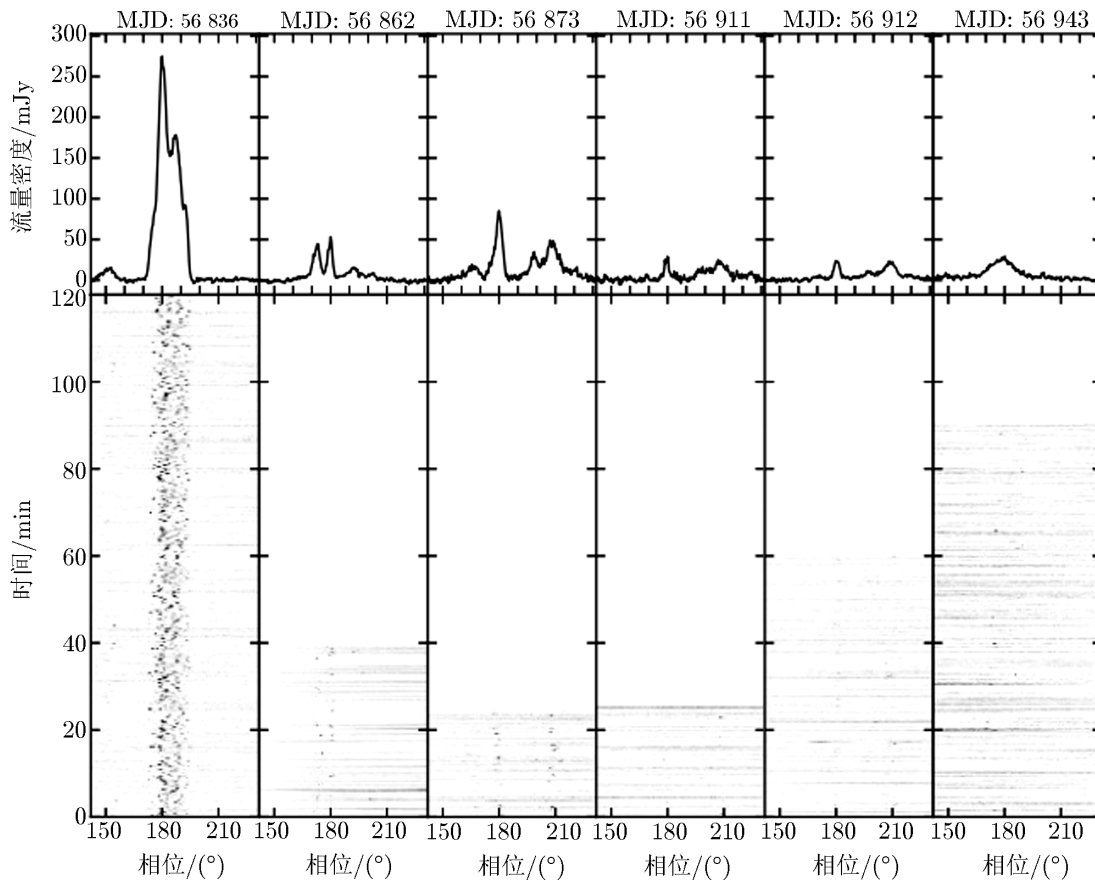


图2 对磁星 SGR 1745-2900 进行的 6 个历元观测的流量密度-相位图和时间-相位图^[101]

分别是 4U 0142+61, 1E 1048.1-5937 和 SGR 0501+4516。由于磁星本身在这些波段的辐射较弱, 且因受到银道面附近的吸收影响, 因此, 只有 1/3 左右的已知磁星被发现有对应体。被探测到的光学对应体的星等范围为 23 ~ 26 mag, 近红外对应体在星等为 19 ~ 22 mag 的 K 型星范围内。由于观测数据还不够丰富, 对磁星光学及红外的研究还有待进一步深入。

3.2 磁星的光变特性

3.2.1 短期爆发

除了在 X 射线波段的持续辐射外, SGR 的另一个典型特征是在其活动周期内发生数量巨大的短期爆发, 这也是此类源被发现的主要原因。短期爆发主要在硬 X 射线或软 γ 射线能量范围内被探测到, 它们通常由单个或几个脉冲组成, 具有快速的上升时间, 且上升时间通常比衰减时间短。这些爆发的峰值光度能够达到约 $10^{35} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$, 典型持续时间在 0.01 ~ 1 s 范围内。已观测到的短期爆发, 其积分通量跨越了 $10^{-17} \sim 10^{-11} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 数量级范围, 并伴随着幂律分布。图 3 为 SGR J0501+4516 短期爆发的光变曲线, 其时间分辨率为 0.005 s。

由图 3 可知, 爆发之间的等待时间也是呈对数正态分布^[103], 且爆发强度与等待时间之间不存在相关性。罗西 X 射线时变探测器 (Rossi X-ray Timing Explorer, RXTE) 的观测表明,

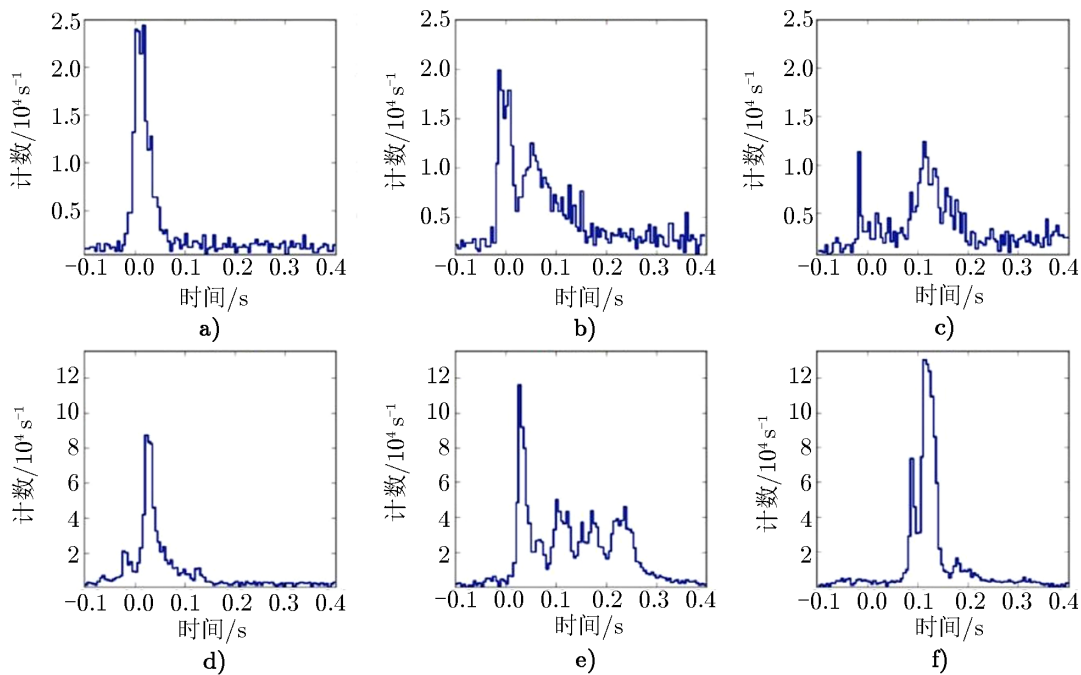


图 3 费米 γ 射线监测器观测到的来自 SGR J0501+4516 的 6 个短期爆发的光变曲线^[102]

AXP 和 SGR 中都有这类短期爆发, 这为确认这两类源之间的关联提供了依据。在对目前已确认为磁星或磁星候选者的 29 个源的观测中发现, 绝大多数都有短期爆发 (详见表 2)。

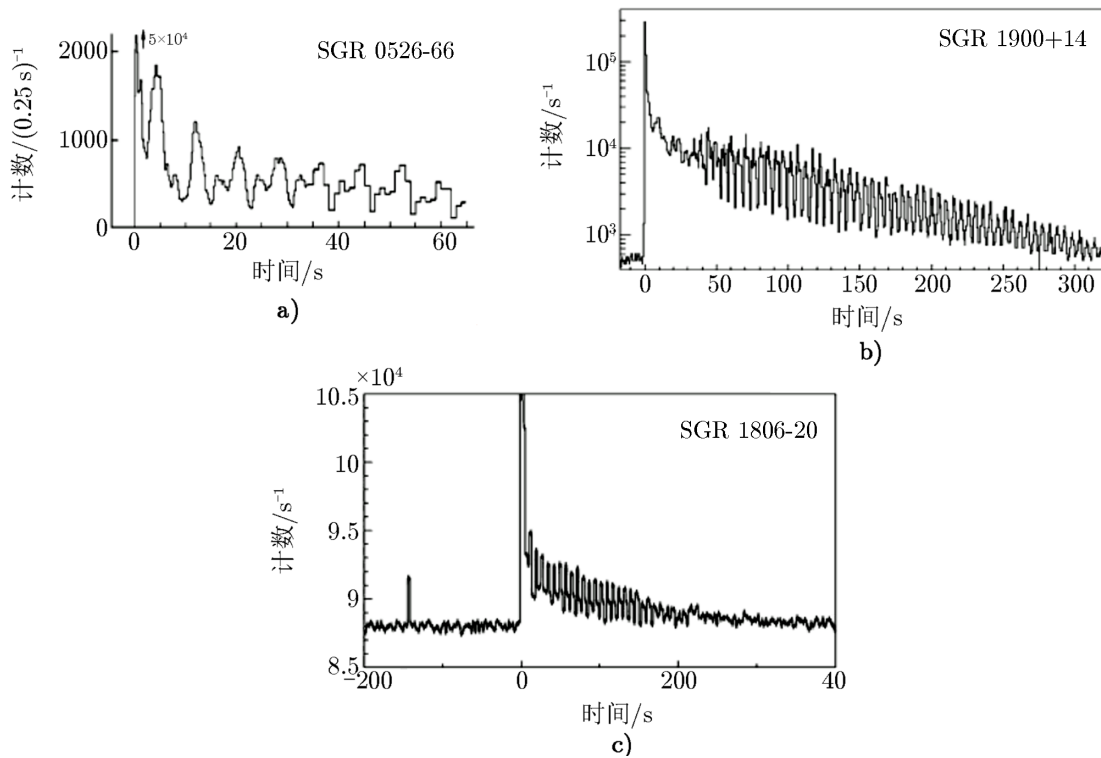
3.2.2 中等闪耀

目前, 人们在 SGR 和 AXP 中都发现了中等闪耀, 它们明显比普通的短期爆发更明亮、更罕见。中等闪耀持续时间通常为 $1 \sim 40$ s, 峰值光度为 $10^{34} \sim 10^{36} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$, 各向同性总能量为 $10^{34} \sim 10^{36} \text{ J}$ 。2001 年 4 月 18 日, 在 SGR 1900+14^[104, 105] 中, 人们发现了迄今为止最强的中等闪耀, 其持续时间大约 40 s。中等闪耀的特征是其存在着伴随中子星自转周期的脉冲, 但没有巨型闪耀的初始长钉状结构。另外, 其能谱方面有着热辐射的谱型。

3.2.3 巨型闪耀

到目前为止, 人们仅发现 3 个巨型闪耀, 且这些巨型闪耀只在 SGR 中被观测到。它们的典型特征是短时间内突然释放出巨大的能量 ($(1.6 \sim 500) \times 10^{37} \text{ J}$)。巨型闪耀有着独特的能谱和时标特征, 由短促的硬长钉结构和较长时间的脉冲尾部结构构成 (见图 4)。初始硬长钉结构的辐射峰值光度超过约 $4 \times 10^{37} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$, SGR 1806-20 的峰值光度甚至可达 $10^{40} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级。它们的典型时标为: 初始长钉结构的上升时标小于几毫秒, 尾部连续性脉冲辐射持续约几百秒^[106]。

初始长钉结构部分爆发出巨型闪耀, 释放出总能量的绝大部分。释放出的能量中, 一部分直接逃逸出去, 成为相对论性膨胀的等离子体; 残留的部分在磁层包裹的热火球中逐渐辐射出去。巨型闪耀的脉冲尾部结构的特征是其流量、时标和能谱性质演化剧烈。它们的谱型比初始长钉状结构软很多, 可用光学薄的韧致辐射来描述, 其典型温度为 10 keV 量级。3 个



注: a) Venera 探测器数据, 能量范围为 50~150 keV; b) 尤利西斯 (Ulysses) 探测器数据, 能量范围为 20~150 keV; c) 国际 γ 射线天体物理实验室 (International Gamma-ray Astrophysics Laboratory, INTEGRAL) 的 SPI/ACS 探测器数据, 能量大于 80 keV。其中 a) 和 c) 中的初始值超过了垂直刻度。

图 4 来自 3 个 SGR 的巨型闪耀的光变曲线^[14]

巨型闪耀的脉冲尾部辐射出的能量的数量级均为 10^{37} J, 然而 SGR 1806-20 的长钉状初始部分的能量比其他 2 个巨型闪耀至少高 2 个数量级 (见表 3)。

表 3 来自 3 个 SGR 的巨型闪耀的对比^[14]

磁星名称		SGR 0526-66	SGR 1900+14	SGR 1806-20
日期		1979-03-05	1998-08-27	2004-12-27
估计距离/kpc		55	15	15
初始 长钉 结构	持续时间/s	≈ 0.25	≈ 0.35	≈ 0.5
	峰值光度/ $J \cdot s^{-1}$	3.6×10^{37}	$> 8.3 \times 10^{37}$	$2 \times 10^{40} \sim 5 \times 10^{40}$
	积分通量/ $J \cdot m^{-2}$	4.5×10^{-7}	$> 1.2 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-3}$
	各向同性能量/J	1.6×10^{37}	$> 1.5 \times 10^{37}$	$1.6 \times 10^{39} \sim 5 \times 10^{39}$
脉 冲 尾 部	持续时间/s	≈ 200	≈ 400	≈ 380
	积分通量/ $J \cdot m^{-2}$	1×10^{-6}	9.4×10^{-6}	5×10^{-6}
	各向同性能量/J	3.6×10^{37}	1.2×10^{37}	1.3×10^{37}
	能谱/keV	30	20	15~30
	脉冲周期/s	8.1	5.15	7.56
	准周期震荡频率/Hz	43	28, 54, 84, 155	18, 30, 92.5, 150, 625, 1 840

3.2.4 长周期 X 射线光变

天文学家在对 AXP 这类中子星的最早观测过程中,发现它们没有典型吸积 X 射线脉冲星中的显著光变现象,并以此作为识别 AXP 的典型特征之一。利用 XMM-Newton 卫星和 Chandra X 射线望远镜,人们获得了足够精确的流量测量数据,并因此发现,几乎所有的磁星都具有长时标的光变现象。除了最极限情况下的跨越几个数量级光度的瞬变现象,磁星还呈现出至少两类不同的长周期光变现象。其中一种爆发现象表现为流量增长的同时,伴随着脉冲分数的减小^[107]。该现象中的脉冲分数从约 91% 变化到约 55%,且流量变大到 2 倍以上^[28]。另外一种现象是,爆发持续几个小时,期间伴随着数十个短期爆发,持续的脉冲状 X 射线的流量比一般状态下高 1 个数量级^[86, 108]。长周期 X 射线光变的发生有两种情况:(1) 流量逐渐变化。该情况通常伴随着能谱、脉冲轮廓和自转速率减慢的变化。X 射线辐射来自于扭曲磁层中电流所产生的共振回旋散射和星体表面加热。星体壳层的塑性形变可能引起磁层扭曲,并最终导致 X 射线光变。(2) 短时标内的高能事件。这种高能事件的发生(如发生周期跃变和爆发事件),可能是某种失稳条件下磁层突然重构引起的。这可能涉及更大能量的释放,其中最极端的例子就是 SGR 中的巨型闪耀。此外,在中子星壳层的冷却过程中,人们可以观测到软 X 射线辐射的长周期衰减。

3.2.5 暂现现象

暂现现象通常指 X 射线源中突然出现,且存在数周或数月以后强度逐渐减弱,甚至消失的现象。通过对暂现现象的探测,并借助理论模型,可以确定目标源的距离、方向和磁场强度等重要物理参数。最早表明暂现磁星存在的证据很偶然地来自对 AX J1845-02 的观测^[47],它是一个周期为 7 s 的 AXP 候选源。而为数不多的有着射电辐射脉冲的磁星 XTE J1810-197^[35]和 1E 1547-54^[7]也有暂现现象。另外,位于年轻星簇 Westerlund 1 的 CXOU J1647-45^[29]也被确认有暂现现象。

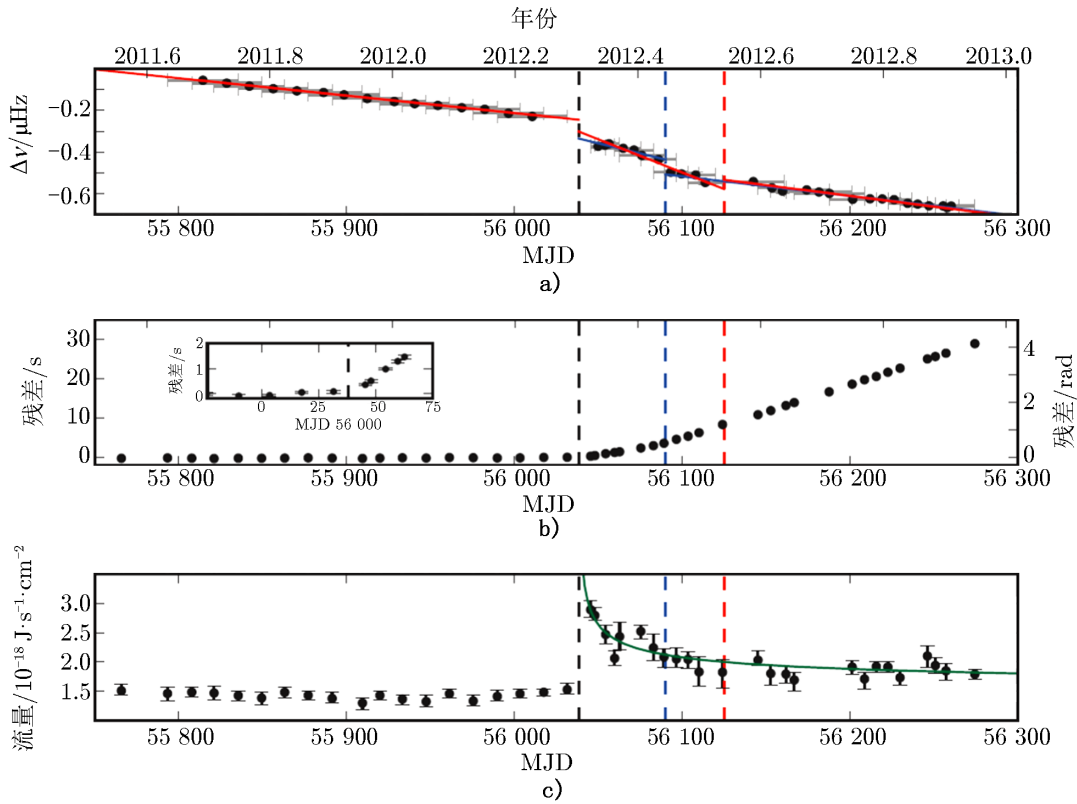
SGR 也有暂现现象。通过不同卫星在 42 d 时间内对 1998 年发现的 SGR 1627-41 观测,发现了超过 100 个爆发,从而确定其有暂现现象。它的 X 射线对应体光度水平约为 $10^{28} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 。SGR 1627-41 的特征表明爆发活动与暂现磁星的光度存在关联。该源的高发状态与其在一段时间内的强爆发活动一致。随后几年里,该源没有出现爆发,而且其光度下降。另外,在爆发和无爆发的交替阶段,SGR 1806-20 和 SGR 1900+14 的 X 射线光度变化不超过 2 倍。更为显著的是,SGR 0526-66 虽然有着高光度,然而自 1979 年以来一直处于爆发不活跃阶段。从表 1 可以看出,在小于 10 keV 的 X 射线观测中,AXP 中已确认发现暂现现象的源有 6 个,SGR 中也有 6 个。

另外,暂现磁星通常伴有短期爆发,并且有着更大的光变现象。暂现磁星中还发现了硬 X 射线辐射。

3.3 磁星的周期跃变现象

1E 2259+586 是一颗自转周期约为 7 s,表面偶极磁场强度为 $5.9 \times 10^9 \text{ T}$ 的磁星。在 RXTE 对其进行的超过 16 a 的监测中,观测到了其稳定的自转减慢率和脉冲流量,只在 2002 年^[86]和 2007 年^[109]分别观测到其周期跃变(表现为自转突然加快)。Archibald 等人^[110]

利用 NASA 的 SWIFT X 射线望远镜, 从 2011 年 7 月开始进行每 14~21 d 一次的观测, 首次观测到了该源一次清晰的反向周期跃变现象, 即一次突然的自转减慢事件 (见图 5)。



注: b) 中小图为 MJD 56 000 附近局部放大后的残差图。

图 5 2011—2012 年 1E 2259+586 的时间和流量性质^[110]

图 5a) 为自转频率与时间变化的关系图, 其中, $\Delta\nu$ 代表频率间隔, 红色和蓝色实线代表两种模型对脉冲到达时间的拟合。图 5b) 为时间残差图。图 5c) 为 2~10 keV 范围内 X 射线流量变化图, 其中绿色曲线为拟合的幂律谱衰减曲线, 谱指数为 -0.38 ± 0.04 。图中的黑色虚线表示反向周期跃变历元。每次观测时, 通过叠加当前电流脉冲中 X 射线时间序列, 获得一次脉冲的到达时间, 并在高信噪比的模板下校准这个叠加的光变曲线。2012 年 4 月 21 日的脉冲到达时间, 清晰地记录了一个反向周期跃变现象。

4 磁星模型

磁星由于其显著的光变特征和极端的物理条件而备受关注。为了解释磁星独特的观测性质, 人们相继提出了不同的理论模型。基于对磁星是否为中子星的不同假设, 这些理论模型可以分为两类: 中子星框架下的理论模型和非中子星框架下的理论模型, 其中, 中子星框架下的扭曲磁层模型给出了磁星形成和演化的物理机制。扭曲的磁层结构能够为磁星的持续辐

射和高能事件的发生提供有效的解释。此外，它还与大多数磁星中存在的强磁场相符合，因此被广泛接受。其他一些模型，则可以解释磁星的部分观测特征或少数磁星的观测性质，例如，热塑性波模型可以有效解释磁星的周期跃变现象，中子星壳层和磁层耦合模型可以合理解释磁星在巨型闪耀过程中释放的巨大能量，而非中子星框架下的夸克新星遗迹模型则可以解释少数有着较低磁场的磁星的观测现象。

4.1 中子星框架下的磁星模型

最著名且普遍认为最佳的中子星框架下的模型是 Thompson 和 Duncan^[111] 提出的扭曲磁层模型，该模型合理地解释了磁星的持续高能辐射和剧烈的爆发现象。近年来，Huang 和 Yu^[112] 基于扭曲磁层模型逐步建立的含有磁流管和电流片的磁层模型，能够很好地解释巨型闪耀爆发前能量的积累以及短时间内巨大能量释放的机制。其他一些理论模型在解释磁星的爆发和闪耀现象时需要添加特定的假设。我们将着重介绍扭曲磁层模型及 Huang 和 Yu 的模型，并简单介绍中子星框架下的其他模型。

4.1.1 磁星的形成和能量起源

Thompson 和 Duncan^[113] 为了解释磁星的物理机制，详细研究了新形成的旋转中子星中的发电机放大效应，并得出如下结论：如果中子星在足够短的时间内形成，且有对流现象，那么，原则上高达 $3 \times 10^{13} \times (1/P_0)$ T 的强磁场能够通过有效的发电机形成（新形成的中子星周期 P_0 为 1 ~ 2 ms）。这样的发电过程虽只持续大约 10 s，但能形成高达 10^{12} T 的强磁场，而且该磁场很可能有着多极结构。

通常中子星的外部磁场被认为是偶极场，而磁星的外部磁场结构更为复杂。很多观测证据表明，磁星的外部磁场存在多极结构^[5, 114]。磁星内部有超过 10^{11} T 强度的强磁场，其磁力足以抵抗磁星壳层的抗张强度，因此，磁星壳层会沿着平行于磁场等势面的方向位移^[111]。磁场从中子星核向外扩散时，中子星壳层也可能在该过程中产生多种小规模破碎。这种持续性的星震活动会在磁层中引起低振幅的阿尔文波（沿磁力线运动的横向电磁波），这有助于 X 射线的辐射。由中子星内部运动引起的外部磁场的扭曲，会诱发磁星中的持续辐射。壳层扭曲的运动维持着磁层中稳定的电流，这为中子星表面的加热提供了额外的能量来源^[115]。

另外，磁星的自转减慢现象在所有有着完备数据的长期观测中都被探测到。理论上认为，年轻的磁星由于强偶极场辐射损耗而经历了急速的自转减慢，并在几千年的演化后自转周期达到数秒的量级。随后磁星减速到能量值为 $E_{\text{mag}} \approx 10^{40} (B/10^{11})^2 (R/10)^3 \approx 10^{39} (P/5) (\dot{P}/10^{-11})$ J，其中， B 为磁场强度， R 为中子星半径。这比它们的旋转动能大很多。如此高的能量足以在长达约 10^4 a 的时间内为持续 X 射线辐射供能。目前探测到的来自 SGR 的 3 个巨型闪耀会释放出高达约 10^{39} J 的能量，其中能量释放最多的巨型闪耀来自 SGR 1806-20，它在巨型闪耀爆发期间释放的总能量约为 $(1.8 \sim 4.6) \times 10^{39}$ J^[106]，大约占磁星磁层总磁场能的 0.1% ~ 0.9%。如此巨大的能量释放表明，磁星在其一生中辐射出的巨型闪耀是有限的。

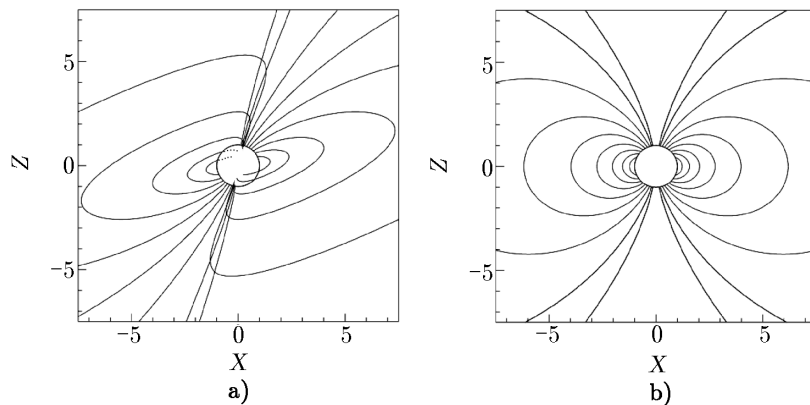
4.1.2 强磁场的证据

根据磁星中测量到的长期自旋减慢现象, 人们可以通过偶极制动关系得到其磁场强度 $B = 3.2 \times 10^{15} (P\dot{P})^{1/2}$ T, 并由此得到磁场强度值为 $(0.5 \sim 20) \times 10^{10}$ T。表明强磁场存在的最有力证据来自 SGR 中观测到的巨型闪耀的极端性质。这种现象的多种性质都可以通过引入强磁场来解释, 如第 3 章所提到的巨型闪耀的典型光变特征是, 初始的硬长钉结构伴随着长的尾部结构, 尾部结构的软的谱型很明显地展示了由于中子星自转带来的周期性调制。热等离子体的磁约束是脉冲调制的尾部结构的原因, 也是强磁场的有力证据^[8]。

其他强磁场的证据包括: (1) 中子星的软 γ 射线爆发所释放的能量超过约 10^3 倍爱丁顿光度, 这需要超强的磁场环境; (2) 巨型闪耀需要足够的磁场自由能为其提供能量; (3) 初始长钉结构的短周期符合整个中子星表面的阿尔文波传播速度^[111]。强的偶极场结构也能够在相对短的时间内使中子星减慢到一个较长的自转周期。例如, SGR 0526-66 的当前自转周期为 8 s, 与其成协的超新星遗迹预示着其年龄约为 10^4 a。

4.1.3 扭曲的磁层结构

在 Thompson 等人^[116]的扭曲磁层模型中, 磁星内部磁场是卷曲的环状结构, 内部磁场的解旋过程剪开了中子星壳层。此后通过形成于中子星表面的磁场, 壳层的转动为外部磁层的演化提供初始条件, 并最终形成中子星外部全局扭曲的磁层结构。射电脉冲星模型中通常假设中子星外部为简单的偶极场结构, 而磁星扭曲磁层模型中假设了一个全局扭曲的磁层。图 6 为磁星的扭曲磁层结构与脉冲星的偶极场磁层结构的对比示意图。



注: 图为磁星磁场线在空间直角坐标系 Z - X 平面的示意图, 其中 a) 为扭曲磁层结构, 南北半球的扭曲角度为 $\Delta\Phi_{N-S} = 2$ rad, 虚线代表中子星后面的场线。b) 为简单的偶极场磁层结构, $\Delta\Phi_{N-S} = 0$ rad。

图 6 扭曲的磁层结构图解^[116]

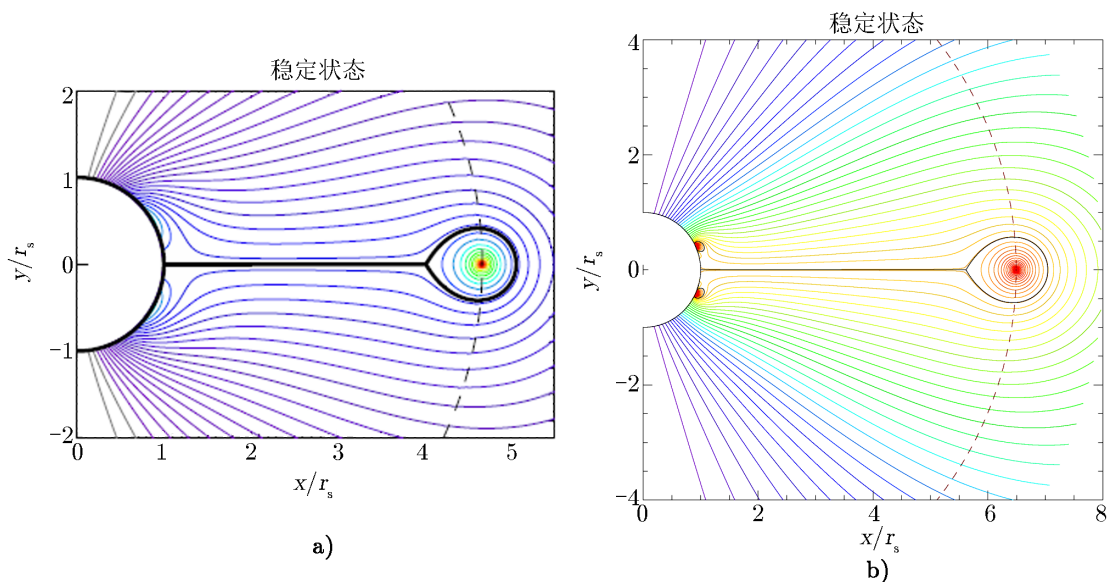
扭曲无力磁层中有高强度的大规模电流。强带电粒子流加热中子星壳层, 使其通过磁层中的共振回旋散射辐射出热光子, 从而产生观测现象中明显的高能尾部结构。另外, 扭曲磁场使得自转减慢扭矩比同样强度偶极场中的强, 而且有观点认为, 扭曲磁场的扭曲角度的增加带来了爆发活动的增加^[117]。磁星 SGR 1806-20 从 1994 年以来 10 a 间的巨型闪耀的演化

过程支持这一观点^[118]。

4.1.4 含有电流片和磁流管的局部扭曲磁层模型

与 Thompson 全局扭曲磁层不同, Yu^[119] 采用了仅限于磁流管内部的局部扭曲磁层模型。该磁流管位于中子星表面的两端, 且充满了由扭曲运动的磁流管驱动的电。随后 Huang 和 Yu^[112, 120, 121] 的数值计算表明, 失稳逃逸的磁流管与磁星表面之间会形成巨大的电流片, 为磁重联的发生提供了一个理想场所, 它所耗散的磁能足够支持 SGR 1806-20 的巨型闪耀以及射电余辉。他们的模型中, 用一个镶嵌在磁层中的螺旋磁流管准静态演化, 给出了能够合理解释巨型闪耀爆发前储能和短时标内瞬间释放巨大能量的物理机制: (1) 磁星表面磁通量或多极场结构的逐渐变化, 会直接影响磁层中磁流管的稳定状态; (2) 磁流管达到失稳状态时, 由于其受力平衡被打破, 会跳跃到距离磁星表面更远处的稳定态, 或逃逸到无穷远处; (3) 两种不同情况下磁流管的演化, 都可解释巨大能量的储存及短时标内能量的释放。

图 7 给出了随着磁星表面边界条件变化, 磁流管磁层中演化到稳定状态时的磁场位型, 其中图 7a) 为磁星表面磁通量逐渐增大导致的演化; 图 7b) 为磁星表面多极场结构演化导致的演化。这两种不同的变化都可能引起原本悬浮在磁层中的处于稳定状态的磁流管因达到失稳状态而发生跳跃或逃逸, 最终打破磁层原有的磁场结构, 并释放巨大能量。

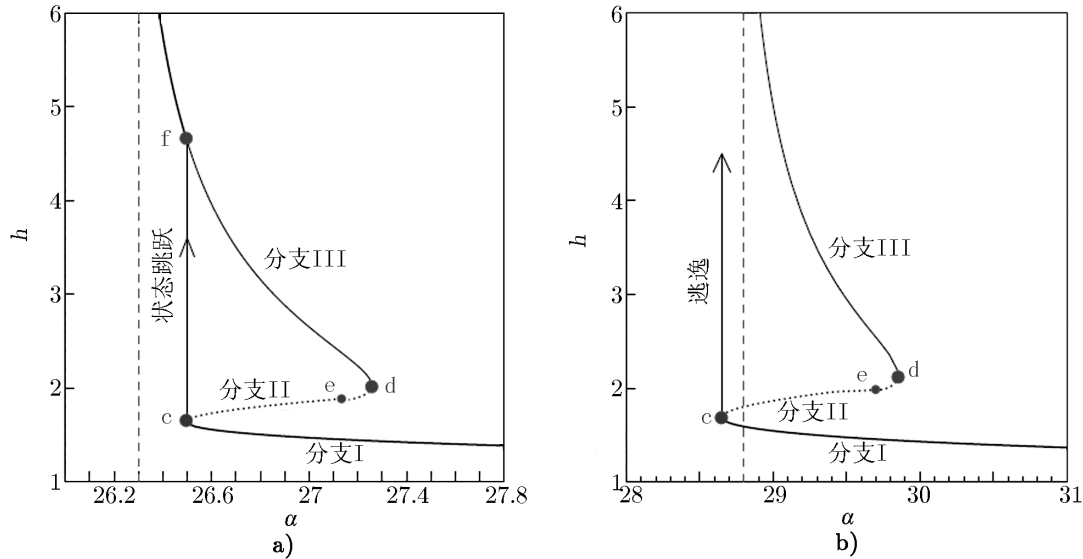


注: 坐标轴 x 和 y 均以磁星半径 r_s 为单位, 它们分别表示二维切面的两个方向。半圆型实线代表磁星表面, 黑色直线代表电流片, 虚线对应磁流管在磁层中的位置。

图 7 磁层模型的磁场位型^[112, 122]

图 8 给出了随着磁星表面边界条件变化的磁流管平衡曲线演化情况^[112]。磁星表面磁通量的变化带来了两种不同的磁流管迁移模式, 图 8a) 为从失稳状态到稳定状态磁流管位置的演化曲线; 图 8b) 为从失稳状态到逃逸至无穷远处的磁流管位置演化曲线。两种变化都可能引

起原本悬浮在磁层中的处于稳定状态的磁流管达到失稳状态, 并发生跳跃或逃逸, 最终打破磁层原有的磁场结构, 并释放巨大能量。另外, 磁星表面多极磁场结构的变化也能带来类似的结果^[122]。



注: a) 到达爆发点后, 跳跃到磁层中位置更高处的稳定点; b) 到达爆发点后, 磁流管逃逸出磁层到达无穷远处。图中, α 为表征磁星表面磁通量强度的无量纲量, h 为磁流管在磁层中的位置; 分支 I 和分支 III 为稳定分支, 分支 II 为不稳定分支; c 点为爆发点, e 点为电流片开始形成处, d 点为不稳定分支 II 与稳定分支 III 的连接点, f 点为稳定点。

图 8 磁层模型的磁流管演化曲线^[112]

4.1.5 中子星框架下其他理论模型

在磁星是中子星的基本假设下, 除了扭曲磁层模型, 人们还提出了一些其他的模型:

(1) 中子星的扭曲磁层解扭模型^[123]。中子星的磁层固定在刚性壳层上, 壳层的突然运动会导致其扭曲。然而扭曲的磁层并不能保持静止状态, 而是逐渐松解开。该模型解释了在一次星震后 XTE J1810-197 的磁层演化。根据磁层解扭模型, 磁星的非热辐射常常在偶极场轴附近延展的闭合磁场线处产生。

(2) 热塑性波模型^[124, 125]。该模型假设磁星壳层是不可压缩的, 在壳层中有远小于阿尔文波切向速度的热塑性波。热塑性波通过耗散磁星壳层内部的磁场能和扭曲外部磁层结构, 产生观测到的磁星活动。热塑性波的波前能强有力地加热中子星壳层, 并可能融化掉壳层, 最终破坏中子星的超流态。融化掉的物质随后以中微子冷却的时标结晶。超流态的上升, 可以将中子星超流体的角动量转换到结晶中, 产生自转加快的周期跃变现象。重复的壳层剪切导致磁星的反复活动现象, 热塑性波的速度决定了中子星壳层的剪切速率以及磁星活动事件的持续时间。

(3) 中子星壳层和磁层耦合模型^[126]。根据该模型, 磁星的巨型闪耀所需的巨大能量, 开

始储存于中子星壳层内部,并随着内部磁场的演化而逐渐释放出来。磁场演化的可能原因是中子星壳层的塑性流,或者在中子星自转减慢时,转动的涡流拖出了中子星核中的超导磁流管。

(4) 磁星的星风制动模型^[127]。在该模型中,磁星被认为是有着强多极场的中子星(取代了强偶极场的假设),粒子外流主导着磁星旋转能量的丢失,多极场导致了磁星的制动力矩、持续辐射和爆发。在星风制动模型中,磁星的时标事件总是伴随着辐射事件发生。

(5) 磁热演化模型^[128]。该模型利用中子星磁场和温度的耦合演化,解释脉冲星观测中出现的多样性(包括磁星在内)。

(6) 回落盘模型^[129]。有着回落盘的中子星模型可以解释一些磁星的性质。假设磁星是有遗迹盘的孤立中子星,引入来自盘的压力可解释磁星的自转迅速减慢现象。观测表明,AXP 4U 0142+61 中存在一个盘结构^[130]。

4.2 非中子星框架的磁星模型

有些模型抛弃了中子星的假设,引入夸克星作为致密恒星的基本构型,并演化出夸克新星模型,以解释磁星的部分现象。这些模型还需要更多观测的验证。这里简单介绍目前流行的非中子星框架下的其他理论模型。

(1) 吸积诱导的星震模型^[131, 132]。用夸克星的表面性质能够解释磁星超爱丁顿光度的巨型闪耀;来自回落盘的吸积能够解释磁星的自转减慢和持续的辐射;有着回落盘的夸克星模型可能统一解释不同类别的类似脉冲星的目标源。

(2) 夸克新星遗迹模型^[133, 134]。超新星爆发后,中子星可能会转变成夸克星,并被称为夸克新星。该模型可以解释有着较低磁场强度(小于 7.5×10^8 T)的磁星 SGR 0418+5729 的观测特性。

(3) 白矮星模型^[135, 136]。如果 AXP 和 SGR 中心是一个白矮星,那么,白矮星的旋转动能能够为 AXP 和 SGR 的持续辐射提供足够的能量。

5 结论和展望

虽然目前已知的磁星只是已观测到的中子星中很少的一部分,但是,由于其独特的观测性质,近年来磁星研究越来越受关注。这显然归因于它们显著的光变特征,以及多波段辐射性质的多样性和极端的物理性质。在过去的几十年中,磁星从被认知甚少的某类独特的高能源,逐渐成为如今被认可的一类重要的孤立中子星。目前,磁星仍有很多性质未被合理解释,而且由于其观测数据不充分,其模型参数不足以被限定。磁星中诸多暂现现象意味着我们目前只发现了磁星群体中很少的一部分。监测 X 射线和 γ 射线光变的宽视场观测仪器的不断出现,对未来磁星领域的进一步发展具有至关重要的意义。

参考文献:

- [1] Mazets E P, Golenetskij S V, Guryan Y A. *Sov Astron Lett*, 1979, 5: 343
- [2] Woods P M, Thompson C. *Compact Stellar X-ray Sources*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 547
- [3] Mazets E P, Golenskii S V, Ilinskii V N, et al. *Nature*, 1979, 282: 587
- [4] Golenetskii S V, Ilyinskii V N, Mazets E P. *Nature*, 1984, 307: 41
- [5] Feroci M, Hurley K, Duncan R C, et al. *ApJ*, 2001, 549: 1021
- [6] Cline T L, Desai U D, Teegarden B J, et al. *ApJ*, 1982, 255: L45
- [7] Mereghetti S, Stella L. *ApJ*, 1995, 442: L17
- [8] Duncan R C, Thompson C. *ApJ*, 1992, 392: L9
- [9] Fahlman G G, Gregory, P C. *Nature*, 1981, 293: 202
- [10] Hellier C. *MNRAS*, 1994, 271: L21
- [11] Thompson C, Duncan R C. *ApJ*, 1996, 473: 322
- [12] Olausen S A, Kaspi V M. *ApJ*, 2014, 212: S6
- [13] McGill Online Magnetar Catalog.[2018-03-08].<http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>
- [14] Mereghetti S. *Astron Astrophys Rev*, 2008, 15: 225
- [15] Lovelace R V E, Tyler G L. *The Observatory*, 2012, 132: 186
- [16] Young M D, Manchester R N, Johnston S. *Nature*, 2009, 400: 848
- [17] Manchester R N. *Neutron Stars and Pulsars*. Berlin: Springer, 2009: 19
- [18] Mereghetti S, Caraveo P, Bignami G F. *A&A*, 1992, 263: 172
- [19] Mereghetti S, Israel G L, Stella L. *MNRAS*, 1998, 296: 689
- [20] Mereghetti S. *Braz J Phys*, 2013, 43: 356
- [21] Li X, Lu F, Li Z. *ApJ*, 2008, 682: 1166
- [22] Possenti A, Cerutti R, Colpi M, et al. *A&A*, 2002, 387: 993
- [23] Lamb R C, Fox D W, Macomb D J, et al. *ApJ*, 2002, 574: L29
- [24] Tiengo A, Esposito P, Mereghetti S. *ApJ*, 2008, 680: L133
- [25] Kern B, Martin C. *Nature*, 2002, 417: 527
- [26] Dhillon V S, Marsh T R, Littlefair S P, et al. *MNRAS*, 2009, 394: L112
- [27] Israel G L, Covino S, Stella L, et al. *ApJ*, 2002, 580: L143
- [28] Tiengo A, Mereghetti S, Turolla R, et al. *A&A*, 2005, 437: 997
- [29] Israel G L, Campana S, Dall' Osso S, et al. *ApJ*, 2007, 664: 448
- [30] Muno M P, Clark J S, Crowther P A, et al. *ApJ*, 2006, 636: L41
- [31] Rea N, Oosterbroek T, Zane S, et al. *MNRAS*, 2005, 361: 710
- [32] Sugizaki M, Nagase F, Torii K, et al. *PASJ*, 1997, 49: L25
- [33] Halpern J P, Gotthelf E V. *ApJ*, 2010, 710: 941
- [34] Tian W W, Leahy D A. *MNRAS*, 2012, 421: 2593
- [35] Camilo F, Ransom S M, Halpern J P, et al. *Nature*, 2006, 442: 892
- [36] Gotthelf E V, Halpern J P. *Astrophysics and Space Science*, 2007, 308: 79
- [37] Livingstone M A, Scholz P, Kaspi V M, et al. *ApJ*, 2011, 743: L38
- [38] Rea N, Israel G L, Esposito P, et al. *ApJ*, 2012, 754: 27
- [39] Scholz P, Ng C Y, Livingstone M A, et al. *ApJ*, 2012, 761: 66
- [40] Esposito P, Tiengo A, Rea N, et al. *MNRAS*, 2013, 429: 3123
- [41] Kargaltsev O, Kouveliotou C, Pavlov G G, et al. *ApJ*, 2012, 748: 26
- [42] Kuiper L, Hermsen W, Mendez M. *ApJ*, 2004, 613: 1173
- [43] Testa V, Rea N, Mignani R P, et al. *A&A*, 2008, 482: 607
- [44] Hulleman F, Tennant A F, van Kerkwijk M H, et al. *ApJ*, 2001, 563: L49
- [45] Kaplan D L, Chakrabarty D, Wang Z, et al. *ApJ*, 2009, 700: 149
- [46] Mereghetti S, Esposito P, Tiengo A, et al. *A&A*, 2012, 546: 30

- [47] Torii K, Kinugasa K, Katayama K, et al. *ApJ*, 1998, 503: 843
- [48] Tam C R, Kaspi V M, Gaensler B M, et al. *ApJ*, 2006, 652: 548
- [49] Esposito P, Israel G L, Turolla R, et al. *MNRAS*, 2010, 405: 1787
- [50] van der Horst A J, Connaughton V, Kouveliotou C, et al. *ApJ*, 2010, 711: L1
- [51] Aptekar R L, Cline T L, Frederiks D D, et al. *ApJ*, 2009, 698: L82
- [52] Dhillon V S, Marsh T R, Littlefair S P, et al. *MNRAS*, 2011, 416: L16
- [53] Tiengo A, Esposito P, Mereghetti S, et al. *MNRAS*, 2009, 399: L74
- [54] Anderson G E, Gaensler B M, Slane P O, et al. *ApJ*, 2012, 751: 53
- [55] Levin L, Bailes M, Bates S, et al. *ApJ*, 2010, 721: L33
- [56] Esposito P, Tiengo A, Mereghetti S, et al. *ApJ*, 2009, 690: L105
- [57] Woods P M, Kouveliotou C, van Paradijs J, et al. *ApJ*, 1999, 519: L139
- [58] Shannon R M, Johnston S. *MNRAS*, 2013, 435: L29
- [59] Bower G C, Deller A, Demorest P, et al. *ApJ*, 2014, 780: L2
- [60] Israel G, Covino S, Mignani R, et al. *A&A*, 2005, 438: L1
- [61] Kouveliotou C, Dieters S, Strohmayer T, et al. *Nature*, 1998, 393: 235
- [62] Esposito P, Israel G L, Turolla R, et al. *MNRAS*, 2011, 416: 205
- [63] Gogus E, Cusumano G, Levan A J, et al. *ApJ*, 2010, 718: 331
- [64] Zhou P, Chen Y, Li X D, et al. *ApJ*, 2014, 781: L16
- [65] Hurley K, Li P, Kouveliotou C, et al. *ApJ*, 1999, 510: L111
- [66] Israel G L, Esposito P, Rea N, et al. *MNRAS*, 2016, 457: 3448
- [67] Barthelmy S D, D'Elia V, Gehrels N, et al. Swift Detection of a likely New SGR: SGR 0755-2933.(2016-03-16). <http://www.astronomerstelegam.org/?read=8831>
- [68] Cline T, Frederiks D D, Golenetskii S, et al. *ApJ*, 2000, 531: 407
- [69] Lamb D, Graziani C, Shirasaki Y, et al. GRB Coordinates Network, 2003, 2351: 1
- [70] Sakamoto T, Barbier L, Barthelmy S D, et al. *Advances in Space Research*, 2011, 47: 1346
- [71] McGarry M B, Gaensler B M, Ransom S M, et al. *ApJ*, 2005, 627: L137
- [72] Gavriil F P, Dib R, Kaspi V M. *ApJ*, 2011, 736: 138
- [73] Gonzalez M E, Dib R, Kaspi V M, et al. *ApJ*, 2010, 716: 1345
- [74] Dib R, Kaspi V M, Gavriil F P. *ApJ*, 2009, 702: 614
- [75] Gavriil F P, Kaspi V M, Woods P M. *Nature*, 2002, 419: 142
- [76] Kuiper L, Hermsen W, den Hartog P R, et al. *ApJ*, 2012, 748: 133
- [77] Mereghetti S, Gotz D, Weidenspointner G, et al. *ApJ*, 2009, 696: L74
- [78] Muno M P, Gaensler B M, Clark J S, et al. *MNRAS*, 2007, 378: L44
- [79] Woods P M, Kaspi V M, Gavriil F P, et al. *ApJ*, 2011, 726: 37
- [80] Dall'Osso S, Israel G L, Stella L, et al. *ApJ*, 2003, 599: 485
- [81] Dib R, Kaspi V M, Gavriil F P. *ApJ*, 2008, 673: 1044
- [82] Sato T A, Nakamura R, Ishida M. *PASJ*, 2010, 62: L33
- [83] Woods P M, Kouveliotou C, Gavriil F P, et al. *ApJ*, 2005, 629: 985
- [84] Gotthelf E V, Gavriil F P, Kaspi V M, et al. *ApJ*, 2002, 564: L31
- [85] Gavriil F P, Kaspi V M, Woods P M. *ApJ*, 2004, 607: 959
- [86] Kaspi V M, Gavriil F P, Woods P M, et al. *ApJ*, 2003, 588: L93
- [87] Rea N, Israel G L, Pons J A, et al. *ApJ*, 2013, 770: 65
- [88] Enoto T, Nakagawa Y E, Rea N, et al. *ApJ*, 2009, 693: L122
- [89] Rea N, Israel G L, Turolla R, et al. *MNRAS*, 2009, 396: 2419
- [90] Mereghetti S, Esposito P, Tiengo A, et al. *A&A*, 2006, 450: 759
- [91] Kaspi V M, Archibald R F, Bhalerao V, et al. *ApJ*, 2014, 786: 84
- [92] Mori K, Gotthelf E V, Zhang S, et al. *ApJ*, 2013, 770: L13
- [93] Palmer D M, Barthelmy S, Gehrels N, et al. *Nature*, 2005, 434: 1107
- [94] Woods P M, Kouveliotou C, Finger M H, et al. *ApJ*, 2007, 654: 470

- [95] Rea N, Viganò D, Israel G L, et al. *ApJ*, 2014, 781: L17
- [96] Mereghetti S, Esposito P, Tiengo A, et al. *ApJ*, 2006, 653: 1423
- [97] Halpern J P, Gotthelf E V. *ApJ*, 2005, 618: 874
- [98] Mereghetti S, Pons J A, Melatos A, et al. *Space Sci Rev*, 2015, 191: 315
- [99] Gotz D, Mereghetti S, Tiengo A, et al. *A&A*, 2006, 449: L31
- [100] Kuiper L, Hermsen W, den Hartog P R, et al. *ApJ*, 2006, 645: 556
- [101] Yan Z, Shen Z Q, Wu X J, et al. *ApJ*, 2015, 814: 5
- [102] Huppenkothen D, Watts A L, Uttley P, et al. *ApJ*, 2013, 768: 87
- [103] Hurley K J, McBreen B, Rabbette M, et al. *A&A*, 1994, 288: L49
- [104] Kouveliotou C, Tennant A, Woods P M, et al. *ApJ*, 2001, 558: L47
- [105] Guidorzi C, Frontera F, Montanari E, et al. *A&A*, 2004, 416:297
- [106] Hurley K, Boggs S E, Smith D M, et al. *Nature*, 2005, 434: 1098
- [107] Mereghetti S, Tiengo A, Stella L, et al. *ApJ*, 2004, 608: 427
- [108] Woods P M, Kaspi V M, Thompson C, et al. *ApJ*, 2004, 605: 378
- [109] Icdem B, Baykal A, Inam S. *MNRAS*, 2012, 419: 3109
- [110] Archibald R F, Kaspi V M, Ng C Y, et al. *Nature*, 2013, 497: 591
- [111] Thompson C, Duncan R C. *MNRAS*, 1995, 275: 255
- [112] Huang L, Yu C. *ApJ*, 2014, 796: 3
- [113] Thompson C, Duncan R C. *ApJ*, 1993, 408: 194
- [114] Xing Y, Yu W F. *ApJ*, 2011, 729: 1
- [115] Thompson C, Duncan R C, Woods P M, et al. *ApJ*, 2000, 543: 340
- [116] Thompson C, Lyutikov M, Kulkarni S R. *ApJ*, 2002, 574: 332
- [117] Marsden D, White N E. *ApJ*, 2001, 551: L155
- [118] Mereghetti S, Gotz D, Mirabel I F, et al. *A&A*, 2005, 433: L9
- [119] Yu C. *ApJ*, 2012, 757: 67
- [120] Huang L, Yu C. *ApJ*, 2014, 784: 168
- [121] Yu C, Huang L. *ApJ*, 2013, 771: L46
- [122] Yao G Z, Huang L, Yu C, et al. *ApJ*, 201, 854: 10
- [123] Beloborodov A M. *ApJ*, 2009, 703: 1044
- [124] Beloborodov A M, Levin Y. *ApJ*, 2014, 794: L24
- [125] Li X Y, Beloborodov A M. *ApJ*, 2015, 815: 25
- [126] Lander S K. *ApJ*, 2016, 824: L21
- [127] Tong H, Xu R X, Song L M, et al. *ApJ*, 768: 144
- [128] Viganò D, Rea N, Pons J A, et al. *MNRAS*, 2013, 434: 123
- [129] Alpar M A. *ApJ*, 2001, 554: 1245
- [130] Wang Z X, Chakrabarty D, Kaplan D L. *Nature*, 2006, 440: 772
- [131] Xu R X, Tao D J, Yang Y. *MNRAS*, 2006, 373: L85
- [132] Xu R X. *Advances in Space Research*, 2007, 40: 1453
- [133] Ouyed R, Leahy D, Niebergal N. *A&A*, 2007, 473: 357
- [134] Ouyed R, Leahy D, Niebergal N. *MNRAS*, 2011, 415: 1590
- [135] Paczynski B. *ApJ*, 1990, 365: L9
- [136] Malheiro M, Rueda J A, Ruffini R. *PASJ*, 2012, 64: 56

Observational Properties and Theoretical Models of Magnetars

YAO Guang-rui^{1,2}, YAN Zhen^{1,4}, HUANG Lei^{1,4}, YU Cong³, SHEN Zhi-qiang^{1,4}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, 519082, China; 4. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: Magnetars are a kind of compact objects powered by extremely strong magnetic energy. Their external magnetic fields are at least 100~1000 times stronger than those of the typical neutron stars observed as radio pulsars powered by the loss of rotational energy. The soft gamma-ray repeaters (SGR) and the anomalous X-ray pulsars (AXP) have been recognized as the most promising candidates for being magnetars in the last decades. Multi-wavelength observations including radio, infrared, optical, X-ray and γ -ray have been carried out to reveal their abundant and special appearance. Meanwhile, various models have been put forward to explain the special properties of magnetars recently. After explaining why it is generally believed that the traditional energy sources at work in other neutron stars cannot power the emission of magnetars, the paper reviews the observational properties of the magnetars including spectral properties, timing properties like anti-glitch, and variability properties such as short bursts, intermediate flares, giant flares, long-term X-ray variability and transients. Finally, the paper describes the main features of the twisted magnetospheres model in detail as well as several alternative models.

Key words: Magnetars; SGR; AXP; giant flare; the twisted magnetospheres model