

反常 X 射线脉冲星的研究进展

陈 蕊^{1,2} 李向东²

(1. 北京大学天文系 北京 100871)

(2. 南京大学天文系 南京 210093)

摘 要

反常 X 射线脉冲星 (Anomalous X-ray Pulsars, 简称 AXP) 是一类特殊的 X 射线源。与 X 射线脉冲星 (通常处于大质量 X 射线双星系统中) 相比, 它们具有以下特征: X 射线谱较软、光度低而稳定 ($\approx 10^{27} \sim 10^{29} \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$)、自转周期集中在 10s 左右且稳定增长、迄今没有找到它们的光学、红外、射电的对应体、有一些可能与超新星遗迹成协等。由观测到的自转周期变化可以确定它们的自转能损不足以提供其 X 射线辐射。解释 AXP 能源机制的理论模型目前主要有两大类: 在吸积模型中, AXP 被认为是具有正常磁场强度 ($\approx 10^8 \text{T}$) 的中子星, 物质吸积提供 X 射线辐射的能源, 并造成中子星的自转变化; 另一种观点认为 AXP 是具有超强磁场 ($\approx 10^{10} \sim 10^{11} \text{T}$) 的中子星 (即磁星), 其辐射能源来自它们巨大的磁场能或残余的热能, 观测到的自转周期及其变化被归因于中子星的磁偶极辐射和物质抛射。两种模型各有优缺点, 但目前看来观测事实对磁星模型较为有利。为了进一步明确 AXP 的性质, 提供解释它们能源机制的线索, 在介绍 AXP 的基本观测特征和理论解释的基础上, 还将 AXP 与射电脉冲星、超强磁场射电脉冲星、射电宁静脉冲星候选体及软 γ 射线复现源分别进行了比较。

关键词 恒星: 脉冲星 — 中子星 — 恒星: 磁场 — 恒星: 吸积 — X 射线源: 恒星

分类号: P145.6

1 引 言

大部分 X 射线双星是由一颗中子星和一颗正常恒星组成的双星系统。双星中的子星通过洛希瓣溢流或星风的方式进行物质交流。吸积物质在落向中子星的过程中将引力势能转化为 X 射线辐射。X 射线双星根据伴星质量的大小可以分为两类: 一类是伴星质量为 $10 \sim 30 M_{\odot}$ 早型星的大质量 X 射线双星, 另一类是伴星质量 $< 1 \sim 2 M_{\odot}$ 的小质量 X 射线双星^[1]。

大质量 X 射线双星中的中子星通常具有很强的磁场 ($\approx 10^8 \text{T}$), 也是 X 射线脉冲星。在中子星的磁层内, 吸积物质束缚在中子星磁场中, 沿着磁力线流向中子星的磁极区域形成吸

积柱, 并产生束状辐射。它们的 X 射线谱可以用以 e 指数衰减的幂律谱拟合 (光子幂律谱指数 $\alpha_{\text{ph}} \approx 1$), 在 20 keV 能量之上有一个陡峭的指数截断; X 射线光度往往高达 $\approx 10^{29} \sim 10^{32} \text{J}\cdot\text{s}^{-1}$, 自转周期分布在 70ms 到约 3h^[2,3] 之间, 并随时间而发生变化。在所有已发现的 60 多颗 X 射线脉冲双星中几乎都可以测出光学子星和 X 射线脉冲星的谱线的多普勒位移^[3,4]。

近几年来, 越来越多的观测证据表明存在不同于上述正常 X 射线脉冲星的脉冲天体。它们有许多独特的特征, 譬如: 软得多的 X 射线谱、低而稳定的 X 射线光度、脉冲周期集中于 6 ~ 12s 的狭窄范围内、自转表现出相对稳定的减慢现象、探测不到光学或射电对应体等。此外, 它们中有一半可能与超新星遗迹成协。于是, 这些脉冲星被归为一类^[5], 称为反常 X 射线脉冲星 (Anomalous X-ray Pulsars, 简称 AXP)^[6]。表 1 列出了目前已知的 6 个 AXP 的主要物理参数, 包括它们的自转周期、位置、与之成协的超新星遗迹等^[7~15]。需要指出的是, X 射线脉冲星 4U 1626-67 虽然具有和 AXP 相近的脉冲周期 ($\approx 7.66\text{s}$), 但其 X 射线谱要硬得多, 光学可见, 并存在持续的自转加速现象^[6,16], 已经被确认为低质量 X 射线双星^[3]。另一个 X 射线源 RX J1838.4-0301 可能有 5.45s 的脉冲^[17], 但尚未为后续观测所证实^[18]。RX J0720.4-3125 的周期、X 射线 / 光学光度比和 X 射线谱虽然与 AXP 相近^[19], 但实际上它的谱比 AXP 还软, 目前对它的性质还存在争论^[28,21]。AXP 的特殊性质对传统的中子星演化理论提出了相当大的挑战。

2 观测特征

2.1 时变特征

表 1 反常 X 射线脉冲星、软 γ 射线复现源和射电宁静脉冲星的主要物理参数^[7,8,11~14]

源	自转周期 P/s	周期变化率 $\dot{P}/\text{s}\cdot\text{s}^{-1}$	特征年龄 $(P/2\dot{P})/\text{kyr}$	成协超新星遗迹	X 射线谱 ^注	
					BB: $kT_{\text{BB}}/\text{keV}$	PL: α_{ph}
1E 1048.1-5937	6.45	$(1.5 \sim 4) \times 10^{-11}$	≈ 5.4	-	≈ 0.64	≈ 2.5
1E 2259+586	6.98	4.8×10^{-13} ^[7]	230	G109.1-0.1	≈ 0.44	≈ 3.9
4U 0142+61	8.69	3.2×10^{-12} ^[8]	45.3	-	≈ 0.4	≈ 4
RXSJ170849-4009	11.00	1.9×10^{-11}	9.6	-	≈ 0.41	2.92
1E 1841-045	11.77	4.1×10^{-11}	4.8	Kes 73	-	≈ 3.4
AX J1845.0-300	6.97	-	-	G29.6+0.1	≈ 0.7	-
SGR1806-20	7.47	$(6.8 \sim 11.6) \times 10^{-11}$	≈ 1.6	-	-	≈ 2.2
SGR1900+14	5.16	6.1×10^{-11}	1.4	G42.8 + 0.6 ^{[10]?}	≈ 0.5	1.1
SGR0525-66	8.1	-	-	N49	不确定	
SGR1627-41 ^[11,12]	6.4?	-	-	G337.0-0.1?	-	
1E 1207-5209 ^[13]	0.424	-	-	G296.5 + 10	≈ 0.25	-
1E 1614-5055 *	0.069	-	-	RCW 103	≈ 0.6	-
1E 0820-4247	0.075?	1.5×10^{-13} ?	8.3?	Puppis A	≈ 0.3	-
RX J0720.4-3125	8.39	-	-	-	≈ 0.08	-
RX J1856.5-3754	-	-	-	-	≈ 0.06	-
RX J0420.0-5022 ^[14]	22.7	-	-	-	≈ 0.057	-

注: BB— 黑体谱 PL— 幂律谱 kT_{BB} — 黑体温度 α_{ph} — 幂律指数

* 已经观测到 1E 1614-5055 的射电对应体 PSR J1617-5055^[76]。

从表 1 易见 AXP 的自转周期分布很集中 ($6 \sim 12\text{s}$)。这是它们被划归为同一类天体的主要原因之一。AXP 自转周期的演化相对稳定, 均有长期自转减慢的趋势 (对有些源, 如 1E2259+586 的观测已持续了 20 多年)。大部分 AXP 的自转周期以几乎不变的速率增加, 减速时标约为 $2000 \sim 4 \times 10^5 \text{ yr}$ 。但也有些源的自转周期导数随时间变化, 如源 1E 1048.1-5937 在 1996 年的减速率是在 1994~1996 年时的 2 倍^[9]。对 1E 2259+586, Baykal 和 Swank 认为它具有与吸积中子星相似的自转起伏, 且可能伴随着 X 射线辐射流的变化^[22]。但随后的观测和分析表明该源的自转十分稳定^[23,8]、其它的源如 1RXS J 170849.0-400910^[8]、4U 0142+61^[9] 的自转变化都非常稳定。与吸积 X 射线脉冲星相比, 这种特征是非常独特的。

2.2 空间分布及 X 射线辐射

AXP 主要分布在银道面附近, 银纬 $|b| \leq 0.5^\circ$ ^[7](见表 2), AXP 在能量小于几 keV 的 X 射线谱有强烈的吸收^[24], 居间的氢的柱密度 $N_{\text{H}} \approx 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, 由此可以估计 AXP 的距离。目前研究的 AXP 都是河内天体^[25]。从估计的距离和观测到的流量得到 AXP 的光度在 $10^{27} \sim 10^{29} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间 (见表 2 及图 1), 比正常的 X 射线脉冲星的光度低约 2~4 个量级。

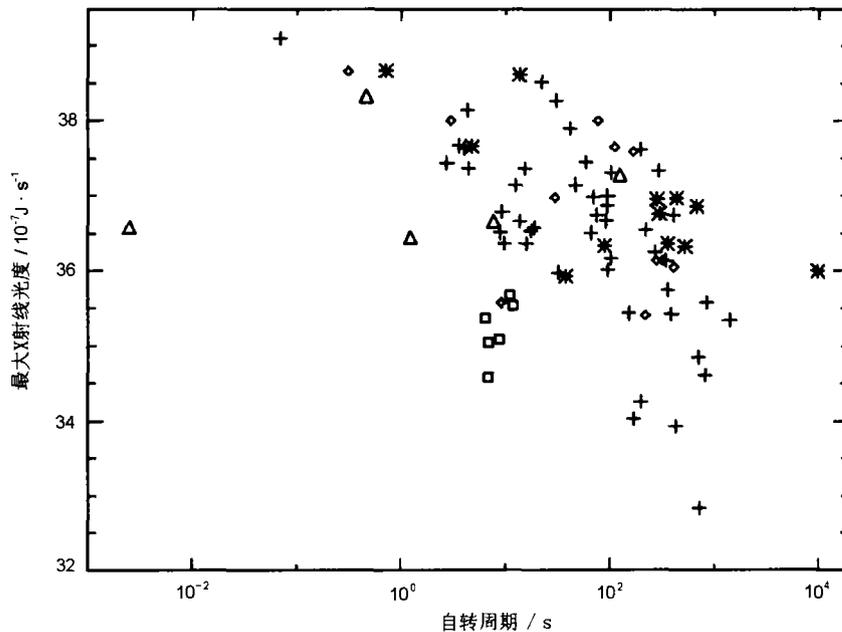


图 1 不同族的 X 射线脉冲星的自转周期和最大 X 射线光度^[74]

共 82 颗脉冲星, 其中 47 颗 Be 星 (+), 12 颗超巨星 (*), 5 颗小质量 X 射线双星 (Δ), 6 颗反常 X 射线脉冲星 (\square), 12 颗未知星 (\diamond)

AXP 区别于 X 射线脉冲星最重要的特征是它们的 X 射线谱 (见图 2, 图 2c 是 5 颗典型的吸积的 X 射线脉冲星的能谱。各图的横坐标是能量间隔, 纵坐标是单位能量间隔单位时间接收到的光子数), 大多数 AXP 的 X 射线谱可以用黑体谱 + 幂律谱来描述, 其中黑体辐射的特征温度为 $0.4 \sim 0.7 \text{ keV}$, 幂率谱指数 $\alpha_{\text{ph}} \approx 3 \sim 4$ 。但是也有例外。例如, 1E 1841-045 的谱

表 2 反常 X 射线脉冲星的位置、距离和光度

源	l	b	d/kpc	z/pc	$L_x/\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$
1E 1048.1-5937	288.3	-0.5	5	+93	2×10^{27}
1E 2259+586	109.1	-1.0	5	-108	5×10^{27}
4U 0142+61	129.4	-0.4	1	-11	8×10^{27}
RXSJ170849-4009	-	-	8	-	9×10^{28}
1E 1841-045	-	-	7	-	3×10^{28}
AXJ1845.0-300	29.6	+0.1	8? 20?	-	5×10^{27}

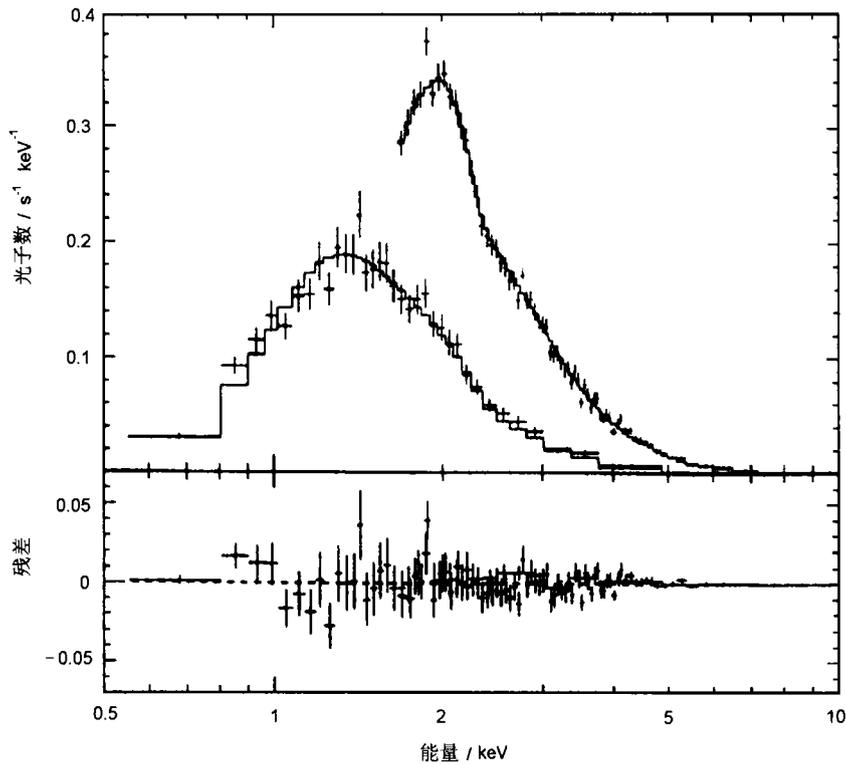


图 2(a) 1E2259+586 的固态成像光谱仪 (Solid-state Imaging Spectrometers) 和气体成像光谱仪 (Gas Imaging Spectrometers) 数据的最佳拟合能谱^[75]

可以用单一的幂律谱描述^[26](不过这可能是由于超新星遗迹 Kes 73 的背景辐射阻碍了对该源黑体谱成分的检测^[9])。另外, AX J1845.0-0300 仅以特征温度约为 0.7 keV 的黑体谱拟合就足够了^[27]。

通常 AXP 的 X 射线辐射参量(如流量、谱轮廓、脉冲轮廓和脉冲百分比等), 相当稳定, 在从小时到年的时标里变化很小或几乎没有变化^[7]。当然也有例外, 如 AX J 1845.0-0300^[28,10] 和 1E 1048.1-5937^[29] 就曾经观测到流量变化。此外, 1E 2259+586 不仅存在流量变化而且在高强度态期间还观测到双峰脉冲谱轮廓的变化以及周期导数的变化^[30]。AXP 低而稳定的 X 射线辐射也令人困惑。

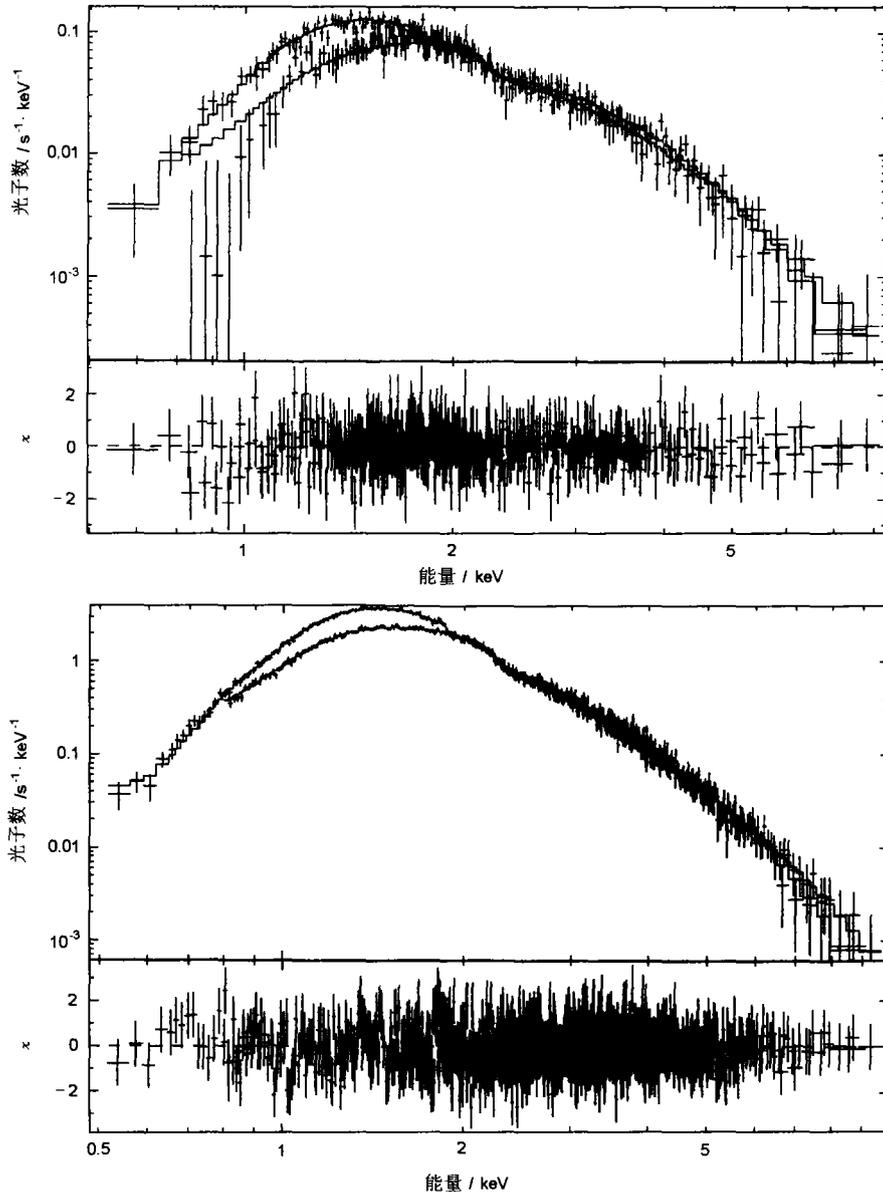


图 2(b) 1E10481-5937(上) 和 4U0142+61(下) 的固态成像光谱仪和气体成像光谱仪数据的最佳拟合能谱^[9]

2.3 光学对应体

许多人对 AXP 光学和射电波段的对应体进行过广泛的搜寻^[31~35], 认为可能的对应体不会是明亮的大质量早型恒星^[7]。虽然 AXP 曾经被认为可能属于低质量 X 射线双星^[5], 但对 AXP 的 X 射线 / 光学观测迄今没有发现亮度的周期性变化 (如交食等) 来证实双星系统的存在。对 1E 2259+586, 1E 1048.1-5937 和 4U 0142+61 在几 min 到 1d 的轨道周期的搜寻也未得到任何结果, 对其它三个源未进行此类观测^[7]。

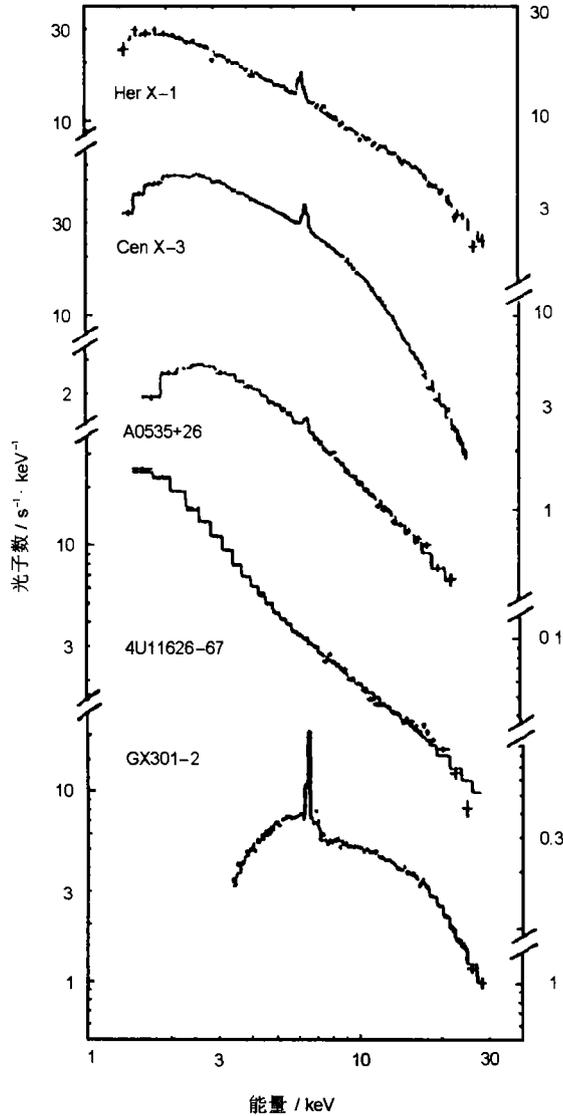


图 2(c) 吸积的 X 射线脉冲星的能谱^[3]

2.4 相关天体

有 3 个 AXP 可能位于超新星遗迹内 (表 3), 这提供了探讨其起源、年龄和距离的线索。这 3 个 AXP 都接近各自的超新星遗迹的几何中心, 意味着这些天体具有相对较小的横向速度。其它 3 个 AXP 周围缺乏可见的超新星遗迹, Mereghetti 认为这可能是由于这些 AXP 的实际年龄远大于 10^4yr ^[7], 不过有人认为这不影响 AXP 是年轻天体的结论, 因为单就已知年轻射电脉冲星来说, 与之成协的超新星遗迹也很少^[8]。

通常判断一个天体是否和超新星遗迹成协主要根据两者的位置、距离、年龄和运动方向。可是对 AXP 这些量的测定均有很大的不确定性, 无法作为准确的判据。AXP 与超新星遗迹成协的最直接根据是 3 个 AXP 非常接近 SNR 的几何中心^[10]。从统计的角度考虑两者成协还是很有可能的, 不过由于有的 AXP 所处的天区很复杂, 它们是否与超新星遗迹成协和到底与哪一个超新星遗迹成协都需要进一步观测和分析。例如, AX J1845-0258 附近天区在 5° 以内有 15 个超新星遗迹^[8], 并且在它附近观察到一个暗的点源: AX J184453-025640, 还无法确定两者是否是同一个源^[36]。

表 3 与异常 X 射线脉冲星和软 γ 射线暴再现源成协的超新星遗迹^[9]

AXP/SGR	超新星遗迹	遗迹年龄 /kyr	遗迹距离 /kpc	β 注	横向速度 /km · s ⁻¹
1E 1841-045	Kes 73	2	7	< 0.2	< 500
AXJ1845.0-300	G29.6+0.1	< 8	20	< 0.15	< 500
1E 2259+586	G109.1-0.1	≈ 10	5	< 0.25	< 500
SGR0525-66	N49 in LMC	5	50	1	2900
SGR1627-41	G337.0-0.1	5	11	2	800
SGR1900+14	G42.8+0.6	10	10	≈ 1.2	≈ 1800

注: β 为致密天体到超新星遗迹中心的距离与超新星遗迹半径之比, 表征致密天体对超新星遗迹中心的偏离程度。

3 模 型

在探索 AXP 本质的过程中, 人们提出了多种模型, 目前主流的理论利用吸积或内禀机制来解释其独特的 X 射线辐射特征。

Paczynski 曾经提出 AXP 可能是由两颗白矮星合并形成的热的、大质量的、快速旋转的白矮星^[37]。虽然白矮星的自转能损足以产生观测到的 X 射线辐射流, 但是该模型有致命的弱点。例如, 由该模型导出的 AXP 的质量应是 $1.4 \sim 1.5M_{\odot}$, 这对白矮星而言是太大了点, 并且没有任何已知的白矮星与超新星遗迹成协等。

Dar 提出奇异星模型来解释 AXP 的特殊观测特征^[38~40]。如果用中子星就足以解释 AXP 的观测现象, 那么奇异星解释似无必要。最近对 RX J 170849.0-4000910 的周期突变 (glitch) 现象的观测^[41]也不利于这个模型。

现在, 大多数人相信 AXP 是中子星, 争论的焦点在于 AXP 的辐射能来源。原则上, 一颗自转的中子星有多种机制可以产生 X 射线: (1) 孤立的中子星通过损失自转动能产生 X 射线辐射。根据观测到的周期 P 和周期变化率 \dot{P} , 可以估计 AXP 的自转能损率: $\dot{E} = 4\pi^2 I \dot{P} / P^3 \approx 10^{25.5} \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$, 远低于观测到的 AXP 的 X 射线光度。因此可以断定 AXP 的辐射不可能来自中子星的自转能。(2) 中子星通过释放磁能来产生辐射。(3) 中子星通过吸积产能。

3.1 磁星模型

1992 年 Duncan 和 Thompson 提出磁星模型来解释软 γ 射线再现源 (SGR) 的特性^[42]。后来他们意识到 AXP 与宁静时期的 SGR 有许多相同的性质 (见本文 4.3 节), 进而提出 AXP 的磁星模型^[43,24]。

Duncan 和 Thompson 论证了在大质量恒星的核心引力坍缩成中子星的最初 30s 内, 中子星内部的对流运动^[44,45]和迅速的自转可能通过发电机行为产生约 $10^{10} \sim 10^{11} \text{T}$ 超强的表面磁场^[42,46,47], 这样的中子星称为磁星。在磁星演化早期, 其磁能远大于自转能; 强磁场通过非线性过程如双极扩散 (ambipolar diffusion) 和霍尔级联 (Hall cascade) 显著衰减^[48], 磁能持续地转化成热消耗掉 (产生 X 射线辐射), 使得强磁场中子星比同龄的无衰减磁场中子星更加明亮。AXP 可能就是磁星在 $10^3 \sim 10^4 \text{yr}$ 年龄段上的观测表现。Thompson 和 Duncan 在 1996 年仔细讨论了磁星内部的物理过程, 指出特强磁场以 10^4yr 的时标从中子星的核心渗出, 热能由核心传导到表面激发出高的 X 射线反常流量。这些中子星的 X 射线光度由于中微子冷却过程 (依赖于核心中子的超流状态) 而限制在 $10^{28} \sim 10^{29} \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内。他们还指出暂现的磁损耗的急变可能导致磁星的周期突变 (glitch) 和 X 射线、 γ 射线的光变。

磁星模型的一个优点是可以自然地解释 AXP 的周期分布和与超新星遗迹成协的特征。磁场为 $10^{10} \sim 10^{11} \text{T}$ 的中子星经过 $10^3 \sim 10^4 \text{yr}$ 的磁偶极辐射, 其自转周期恰好是 10s 左右。

近年来, 不少观测事实倾向支持磁星模型^[8~10,34,36,41]。Kaspi 等人用 RXTE 卫星对 1RXS J 170849.0-400910 和 1E 2259+586 进行了长期的 X 射线时变观测。发现这些天体自转非常稳定, 而双星吸积的天体不大可能如此^[8]。Paul 等人为研究 AXP 的 X 射线辐射的稳定性, 用 ASCA 卫星对 4U 0142+61 和 1E 1048.1-5937 进行了观测, 发现 1E 1048.1-5937 自转减速率的变化幅度不能引起观测到的 X 射线光度变化, 这与典型的吸积天体的行为不一致^[9]。Gaensler 等人利用甚大天线阵 (VLA) 的观测认为超新星遗迹 G29.6+0.1 与 AX J1845-0258 成协, 说明

AX J1845-0258 是年轻的天体, 这正与磁星解释一致^[10]。Hulleman 等人对 1E 2259+586 作了深入的搜寻也没有找到其光学对应体, 因此认为它不是盘吸积天体^[34]。

一些 AXP(如 1E 2259+586 和 1E 1048.1-5937) 的自转周期导数的变化曾经被用作为反对磁星模型的证据。但 Heyl 和 Hernquist 认为这种自转速率减慢的起伏可以用类似于发生在射电脉冲星上的周期突变来解释^[49](Kaspi 等人观测到 1RXS J170849.0-4000910 的周期突变现象^[41])。Melatos 提出另外一种解释, 认为由于某种“辐射进动”(radiative precession), 星体内外壳层的较差运动导致 \dot{P} 的 5 ~ 10yr 周期性振荡^[50]。这些理论都建立在磁星假设的基础上。

磁星模型面临的困难是对强磁场下中子星的物理性质所知甚少, 因此该模型有相当大的不确定性。此外, 如果辐射来自中子星残余的热能, 那么中子星的表层必须主要由轻元素(氢或氦)构成^[51]; 如果是场衰变提供能量, 这种衰变过程要求初始场强 $B_0 \geq 10^{12}$ T^[21]。对于 SGR, 磁星解释还存在着源特征时标与成协超新星遗迹年龄不一致以及源横向运动速率偏大的问题, 但对 AXP 这两个问题还不是很尖锐。

3.2 吸积模型

吸积模型的潜在优势是它不涉及那些性质不明的过程, 从而是最为保险的解释。吸积物质不仅提供辐射能源, 同时通过与中子星磁场的相互作用改变中子星的自转周期。在这类模型中通常假设 AXP 的自转周期接近其平衡周期(即中子星磁层半径与共转半径大致相等)^[1]

$$P_{\text{eq}} \approx 1.6 \left(\frac{B_0}{10^8 \text{T}} \right)^{6/7} \left(\frac{R}{10 \text{km}} \right)^{18/7} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-5/7} \left(\frac{\dot{M}}{10^{17} \text{g} \cdot \text{s}^{-1}} \right)^{-3/7} \quad (\text{s})$$

从观测到的光度和周期可以推出 $B \leq 10^8$ T。

在吸积模型中吸积物质的可能来源有: (1) 双星系统中的低质量伴星^[5]; (2) 如果 AXP 是单星时的星际介质^[20,52]; (3) 环绕中子星的残余盘, 该盘可能是大质量 X 射线双星公共包层相的演化产物^[6,16] 或超新星爆发物质的残骸。

AXP 不大可能是双星系统, 因为迄今为止对 AXP 伴星的搜寻都是不成功的, 这就限制了伴星的质量和轨道周期必须很小。由于一半的 AXP 与年轻的超新星遗迹成协, 这带来了年龄冲突; 并且, 低质量双星系统很易由于超新星爆发而瓦解^[53], 一般而言, 在典型的星际介质参数和中子星速度下 ($n \approx 1 \text{cm}^{-3}$, $V \approx 100 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$), 对星际介质的吸积无法提供所要求的 AXP 光度。因此将 AXP 解释为低质量双星系统或星际介质中的吸积中子星均难以成立。

van Paradijs 等人指出^[6], 对于部分密近高质量 X 射线双星, 物质转移会形成包围双星系统的公共包层, 中子星的运动轨道逐渐减小, 与大质量的伴星核心并合, 最终形成一颗孤立的中子星, 周围环绕着由公共包层物质遗留下的吸积盘, 它们可以表现为 AXP。Ghosh 等人在此基础上分析了 AXP 的动力学和辐射特征^[16]。他们认为在 AXP 的周围存在两类吸积流。一类是产生于公共包层中具有较高角动量物质的盘吸积流, 另一类是角动量较小的球对称吸积流。前者产生 AXP 辐射中的幂律谱成分, 并造成 AXP 的周期变化; 后者落向中子星的大部分表面, 通过黑体辐射产生 AXP 辐射的软成分。估计得到的黑体温度与 AXP 的特征温度大体是相符的。但这个模型面临的问题是: 对于公共包层相的演化和在该演化阶段中子星轨道束缚能转化为包层动力学喷流的效率难以确定; 吸积盘的寿命太短, 也就无法产生观

测到的 AXP 的自转减慢行为等^[54]。此外观测也不倾向支持吸积模型(例如,甚至在短的时间标上也观测不到 Doppler 位移^[55],也缺乏可观测到的光学、红外伴星或吸积盘^[5]);这些源的周期演化行为和 X 射线谱与已知的吸积中子星很不同^[56,8,9],按吸积中子星的标准来看,AXP 自转过于稳定,观测表明它们自转减速的起伏是间歇的,这是 AXP 的吸积解释的一个最不利的问题。

Chatterjee 等人最近提出新的吸积模型^[57,58]。在大质量前身天体的核心坍缩形成中子星的过程中,超新星爆发向外抛射物质中的一小部分有可能回落并被中子星俘获。具有足够角动量的部分回流物质会在大约 1ms 内形成一个小的环绕中子星的吸积盘。中子星的演化取决于磁层半径 R_m 、共转半径 R_c 与光速圆柱半径 R_{lc} 的相对大小。如果 $R_m > R_{lc}$, 盘将独自演化而不影响中子星的辐射和自转。这样中子星将表现为普通的射电脉冲星。当 $R_{lc} > R_m > R_c$ 时,中子星处于“螺旋桨相”(the propeller phase)。吸积盘中的物质由粘滞过程带到磁层边缘,但随后离心力导致物质抛射,并带走中子星的部分角动量。这样的天体是快速自旋减慢而且 X 射线暗弱的源。当 R_m 接近 R_c 时,系统达到一个准平衡态。这时中子星的自转大体和盘在磁层半径处的转动周期相合,但中子星的 X 射线辐射依然相当强。当吸积率小于 $10^{16} \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,吸积流最终形成平流为主的吸积流 (ADAF), 这时 X 射线辐射光度与 AXP 的观测值相当。他们认为 AXP 就是处于准平衡态 ADAF 相初期的天体。取合适的磁场强度、初始自转周期和盘质量 ($B_{12} \geq 5$, $P_0 = 0.015 \text{s}$, $M_d = 0.006 M_\odot$), 他们发现一个中子星在约 10000 ~ 40000yr 的时间内,自转可以减慢到观测到的 AXP 的周期,即 $P \approx 10 \text{s}$ ^[57]。Perna, Hernquist 和 Narayan 就 Chatterjee 等人的模型中吸积盘可能发出的光学、红外和亚毫米波段的辐射进行了数值计算,结果发现以目前的观测水平可以检验^[59]。

这个模型看来是目前吸积模型中最为合理的,但它仍然无法解释 AXP 和正常 X 射线脉冲星显著差异的原因,并且模型本身并不自恰,在 ADAF 相时吸积流内气体的运动不再是标准薄盘中的开普勒转动,其共转半径的大小发生了明显的改变,中子星不可能仍处于原先的平衡态。

4 与其它天体的比较

作为中子星的一类特殊天体,通过比较 AXP 与其它类型的中子星的异同可以在一定程度上推动相关理论的发展。射电脉冲星与 AXP 的性质有很大的不同,这暗示着中子星可能有两种完全不同的演化路径。射电宁静脉冲星候选体及软 γ 射线复现源 (SGR) 在观测上与 AXP 有许多相似之处。它们到底有什么本质的共性还是个待解的谜。

4.1 与射电脉冲星的比较

与 AXP 狭窄的周期分布相比,射电脉冲星周期从 1.5 ms^[60] 一直延伸到 8.51s^[61]。射电脉冲星周期变化率的典型值为 $10^{-15} \text{s} \cdot \text{s}^{-1}$, AXP 则要大 2 ~ 4 个量级(见表 1)。如果 AXP 的自转变化和射电脉冲星一样是由磁偶极辐射引起,则它们的磁场要比典型的射电脉冲星磁场 ($\approx 10^8 \text{T}$) 高 2 个量级。

射电脉冲星很少发出 X 射线脉冲,即使有 X 射线,光度也远低于它们的自转能损^[62]。而 AXP 的 X 射线光度远远超过自转减速的能损。相反, AXP 表现为射电宁静。Baring 和

Harding 认为这是由于在超强磁场 ($B \geq 10^{10}\text{T}$) 中中子星表面的高能光子分裂过程取代了电子对的产生, 从而抑制了射电辐射 [63,64]。

至少在几年的时标上, 一些 AXP 是非常稳定的自转子 [8], 其时变噪声与射电脉冲星相似 [51,41]。Kaspi、Lackey 和 Chakrabarty [41] 观测到 1RXS J170849.0-4000910 存在和射电脉冲星 Vela 及其它年轻射电脉冲星大小相似的周期突变 (glitch) 现象, 这暗示着该 AXP 有与这些射电脉冲星类似的内部结构。

只有很少的高能的快速自转的射电脉冲星确实与超新星遗迹成协。根据 AXP 距超新星遗迹中心的距离和遗迹年龄估计 AXP 的横向运动速度与射电脉冲星的相似。

最近, 在对射电脉冲星的多束巡天观测中发现了三颗具有特强磁场的射电脉冲星, 其中 PSR J 1814-1744 的自转参数与 1E 2259+586 非常相似 [65](见图 3 和表 4)。这就引发了这样一个问题: 既然特性如此接近, 为什么 1E 2259+586 辐射 X 射线而 PSR J 1814-1744 却只辐射射电波?

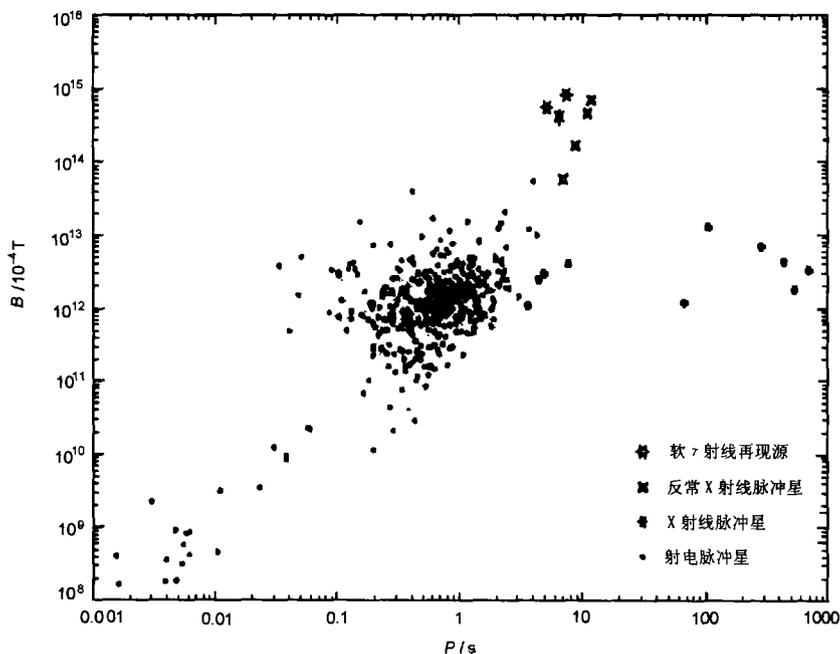


图 3 AXP、SGR、射线脉冲星和 X 射线脉冲星的周期 - 磁场强度图 (P-B)

竖线代表误差棒, 假设 AXP 和 SGR 能量损失导致的自转减慢仅是磁偶极辐射造成, 不考虑星风带走的能量

Pivovarov、Kaspi 和 Camilo 比较了两者的相似之处 (见表 4), 并由过去 ROSAT 和 ASCA 的观测档案得出 PSR J1814-1744 的 X 射线光度上限比所有 AXP 明显低许多, 因而认为射电脉冲星和 AXP 有着不同的演化路径, 即决定 AXP 性质的不仅仅是它们的强磁场, 可能还有其它的未知因素 [66]。

Zhang 和 Harding 提出了另一种观点 [67]。他们认为强磁场的射电脉冲星和磁星的演化实

表 4 射电脉冲星 PSR J1814-1744 和 AXP 1E2259+586 的比较

参 数	PSR J 1814-1744 ^[60]	1E 2259+586 ^[7,60]
自转周期 P/s	4.0	7.0
周期变化率 $\dot{P}/s \cdot s^{-1}$	7.4×10^{-13}	4.9×10^{-13}
表面磁场 B/T	5.5×10^9	5.9×10^9
特征年龄 $(P/2\dot{P})/kyr$	85	230
自转能损率 $\dot{E}/J \cdot s^{-1}$	4.7×10^{25}	5.7×10^{24}

实际上是统一的。差别仅仅在于两者磁轴和自转轴的夹角不同: AXP 两轴夹角为钝角(即反平行转子)而 PSR J1814-1744 的夹角是锐角(即平行转子)。这点差别决定了 AXP 不能像后者那样形成活跃的内部粒子加速以产生射电辐射。这是一个非常简洁的图像。但如果真像他们所说的那样,仅仅由于几何因素导致了两类相似天体的不同辐射行为,那么这种几何上的差别应该是随机的。而目前观测结果显示,与平行转子(射电脉冲星)相比反平行转子(AXP)的数目极少。

4.3 与射电宁静的脉冲星候选体和软 γ 射线再现源 (SGR) 的比较

由于目前射电宁静脉冲星候选体的观测资料较少,比较仅限于一些表面的相似之处。在超新星遗迹 G296.5+10.0、Puppis A 中的一些未分解的致密 X 射线源除了缺少脉冲外具有与 AXP 相似的性质,如高 X 射线 / 光学光度比,软谱(典型黑体温度 $kT \leq 0.6$ keV)且光度低等。有作者认为典型源 RX J0720.4-3125 是磁星^[21], Alpar 则认为它是暗弱的单中子星,是处于 AXP、SGR 演化前期的天体^[68,69]。另外,如果最终证实 1E 0820-4241 的脉冲周期为 0.075 s^[76],那么它显然不属于 AXP^[7]。

软 γ 射线再现源 (SGR) 是具有短的软 X 射线谱 (≤ 10 keV) 的天体。除了会发生零星的超爱丁顿光度的 γ 射线爆发^[12]外,宁静态的 SGR 与 AXP 还有许多相似的特征: (1) 两者有相似的脉冲行为,脉冲周期均局限于一个窄的范围内 (AXP: $6 \sim 12$ s; SGR: $5 \sim 8$ s); (2) SGR 有与 AXP 相似的软的 X 射线谱 ($\approx 10^{28} J \cdot s^{-1}$),即使在剧烈活动时期,SGR 的 X 射线辐射仍是基本稳定的^[71],也是射电宁静的; (3) 两者均未发现光学对应体; (4) SGR 的周期演化也比较稳定,长期自转减慢,减速时标与 AXP 相近,自转能损均不足以提供其 X 射线辐射; (5) 一半的 SGR 和 AXP 可能与超新星遗迹成协。

AXP 很可能是不活动的或处于宁静相中的 SGR^[46,72,73]。SGR 和 AXP 在演化中的先后次序并不清楚。由于 SGR 的特征年龄通常比 AXP 稍小(见表 1),说明 SGR 可能是 AXP 的前身^[73],但也有人认为宁静相可发生在磁星阶段的早期,SGR 是 AXP 的后续天体^[56,25]。

在磁星模型中,磁场的活动可以很好地解释 SGR 的爆发现象,吸积模型对此无能为力。因此,搞清两者的关系对于最终确定 AXP 的产能机制至关重要。

5 讨 论

AXP 仍然是银河系中谜样的高能天体。在今后的研究中,可望解决或值得探索的问题是:

- (1) 发现更多的 AXP。从而获得 AXP 更详尽的统计特性。
- (2) 用 Chandra 卫星观测 AXP 谱的更精细结构,直接从能谱中导出 AXP 的磁场强度。

所有的吸积模型对 AXP 场强的估计在 10^8 T 左右, 而磁星模型则要求 AXP 具有较大的的磁场强度 ($10^{10} \sim 10^{11}$ T)。

(3) 对 AXP 可能的周期变化过程进行长期细致的监测。因为反对磁星模型的一个观点就是该模型无法解释 AXP 的周期导率的变化。那么到底 AXP 周期演化遵循怎样的规律, 对于解决能源机制之谜是很重要的。

(4) 对 AXP 的距离、年龄、横向运动速度等进行更为准确的测量。这对于搞清 AXP 和超新星遗迹成协与否及与哪一个超新星遗迹成协十分重要。这对于超新星遗迹的研究在很大程度上也有帮助。

参 考 文 献

- 1 Bhattacharya D, van den Heuvel E P. *Phys. Rev.*, 1991, 203: 1
- 2 Finley J P, Belloni T, Cassinelli J P. *Astron. Astrophys.*, 1992, 262: L25
- 3 Nagase F. *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 1989, 41: 1
- 4 乔国俊, 徐仁新. *X 射线天体物理学*, 北京: 科学出版社, 1999. 221
- 5 Mereghetti S, Stella L. *Ap. J.*, 1995, 442: L17
- 6 van Paradijs J, Taam T E, van den Heuvel E P J. *Astron. Astrophys.*, 1995, 299: L41
- 7 Mereghetti S. Invited review presented at the NATO Advanced Study Institute, The Neutron Star-Black Hole Connection, Elounda, Crete-7-18 June 1999(astro-ph/9911252)
- 8 Kaspi V M, Chakrabarty D, Steinberger J. *Ap. J.*, 1999, 525: L33
- 9 Paul B, Kawasaki M et al. *Ap. J.*, 2000, 537: 319
- 10 Gaensler B M. In: Kramer M, Wex N, Wielebinski N eds. *Pulsar Astronomy, 2000 and Beyond*. ASP Conf. Series, 1999, 202: 703
- 11 Lorimer D R, Kilouris K M. *Ap. J.*, 2000, 545: 385
- 12 Hurley K. In: Kippen R M, Mallozzi R S, Fishman G J eds. *Proceedings of the 5th Huntsville GRB Symposium*, New York: AIP Press, AIP Conf. Proc., 2000, 526: 763
- 13 Hurley K, Li P et al. *Ap. J.*, 1999, 510: L111
- 14 Zavlin V E, Pavlov G G et al. *Ap. J.*, 2000, 540: L25
- 15 Haberl F, Pietsch W, Motch C. *Astron. Astrophys.*, 1999, 351: L53
- 16 Ghosh P, Angelini L, White N E. *Ap. J.*, 1997, 478: 713
- 17 Schwentker O. *Astron. Astrophys.*, 1994, 286: L47
- 18 Song L, Mihara T, Matsuoka M et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 2000, 52: 181
- 19 Haberl F et al. *Astron. Astrophys.*, 1997, 326: 662
- 20 Wang J C L. *Ap. J. Lett.*, 1997, 486: 119
- 21 Heyl J S, Kulkarni S R. *Ap. J.*, 1998, 506: L61
- 22 Baykal A, Swank J H. *Ap. J.*, 1996, 460: 470
- 23 Baykal A, Swank J H, Strohmayer T et al. *Astron. Astrophys.*, 1998, 336: 173B
- 24 Thompson C, Duncan R C. *Ap. J.*, 1996, 473: 322
- 25 Thompson C, Duncan R C, Woods P M. *Ap. J.*, 2000, 543: 340
- 26 Gotthelf E V, Vasisht G. *New Astronomy*, 1998, 3: 293
- 27 Gotthelf E V, Vasisht G. *Ap. J.*, 1997, 478: 713
- 28 Torii K et al. *Ap. J.*, 1998, 503: 843
- 29 Oosterbroek et al. *Astron. Astrophys.*, 1998, 334: 925
- 30 Iwasawa K, Koyama K, Halpern J P. *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 1992, 44: 9
- 31 Coe M J, Jones L R, Lehto H. *M.N.R.A.S.*, 1994, 270: 178
- 32 Davis S R, Coe M J. *M.N.R.A.S.*, 1991, 249: 313

- 33 Coe M J, Pightling S L. *M.N.R.A.S.*, 1998, 299: 223
- 34 Hulleman F *et al.* *Astron. Astrophys.*, 2000, 358: 605
- 35 Mereghetti S, Mignani R P *et al.* *M.N.R.A.S.*, 2001, 321: 143
- 36 Vasisht G, Gotthelf E V, Torii K *et al.* *Ap. J.*, 2000, 542: L49
- 37 Paczynski B. *Ap. J.*, 1990, 365: L9
- 38 Dar A. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1999, 138: 505
- 39 Dar A. 1999, (astro-ph/9911473), 未发表
- 40 Dar A *et al.* 2000, (astro-ph/0002014), 未发表
- 41 Kaspi V M, Lackey J R, Chakrabarty D. *Ap. J.*, 2000, 537: L31
- 42 Duncan R C, Thompson C. *Ap. J.*, 1992, 392: L9
- 43 Thompson C, Duncan R C. *M.N.R.A.S.*, 1995, 275: 255
- 44 Burrows A. *Ap. J.*, 1987, 318: L57
- 45 Burrows A, Lattimer J M. *Phys. Rep.*, 1988, 163(1-3): 51
- 46 Thompson C, Duncan R C. *Ap. J.*, 1993, 408: 194
- 47 Thompson C. 2000, (astro-ph/0010016), 未发表
- 48 Goldreich P, Reisenegger A. *Ap. J.*, 1992, 395: 250
- 49 Heyl J S, Hernquist L. *M.N.R.A.S.*, 1999, 304: L37
- 50 Melatos A. *Ap. J.*, 1999, 519: L77
- 51 Heyl J S, Hernquist L. *Ap. J.*, 1997, 491: L95
- 52 Marsden D *et al.* *Ap. J.*, 2001, 550: 397
- 53 黄润乾. *天文学进展*, 1999, 17(1): 62
- 54 Li X D. *Ap. J.*, 1999, 520: 271
- 55 Mereghetti S, Israel G L, Stella L. *M.N.R.A.S.*, 1998, 296: 689
- 56 Gotthelf E V, Vasisht G, Dotani T. *Ap. J.*, 1999, 522: L49
- 57 Chatterjee P, Hernquist L, Narayan R. *Ap. J.*, 2000, 534: 373
- 58 Chatterjee P, Hernquist L. *Ap. J.*, 2000, 543: 368
- 59 Perna R, Hernquist L, Narayan R. *Ap. J.*, 2000, 541: 344
- 60 Backer D C, Kulkarni S R *et al.* *Nature*, 1982, 300: 615
- 61 Young M D, Manchester R N, Jonson S. *Nature*, 1999, 400: 848
- 62 汪珍如. *X 射线天体物理学*, 北京: 科学出版社, 1999. 367
- 63 Baring M G, Harding A K. *Ap. J.*, 1998, 507: L55
- 64 Baring M G, Harding A K. *Ap. J.*, 2001, 547: 929
- 65 Camilo F, Kaspi V M *et al.* *Ap. J.*, 2000, 541: 367
- 66 Pivovarov M J, Kaspi V M, Camilo F. *Ap. J.*, 2000, 535: 379
- 67 Zhang B, Harding A K. *Ap. J.*, 2000, 535: L51
- 68 Alpar M A. 1999, (astro-ph/9912228), 未发表
- 69 Alpar M A. *Ap. J.*, 2001, 554: 1245
- 70 Pavlov G G, Zavlin V E, Truemper J. *Ap. J.*, 1999, 511: L45
- 71 Murakami T, Kubo S *et al.* *Ap. J.*, 1999, 510: L119
- 72 Vasisht G, Gotthelf E V. *Ap. J.*, 1997, 486: L129
- 73 Kouveliotou C, Dieters S, Strohmayer T *et al.* *Nature*, 1998, 393: 235
- 74 Tiengo A. Thesis, Milano: University of Milano, 1999
- 75 Parmar A N, Oosterbroek T, Favata F *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1998, 330: 175

The Anomalous X-ray Pulsars

Chen Rui^{1,2} Li Xiangdong²

(1. *Department of Astronomy, Peking University, Beijing 100871*)

(2. *Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093*)

Abstract

In the last few years it has been recognized that a group of X-ray pulsars have peculiar properties which set them apart from the majority of accreting pulsars in X-ray binaries. They are called the Anomalous X-ray Pulsars (AXP). These objects are characterized by very soft X-ray spectra with low and steady X-ray fluxes, narrow-distributed spin periods, steady spin-down, no optical/infrared counterparts. Some of them may associate with supernova remnants. The nature of AXP remains mysterious. It has been suggested that AXP are accreting neutron stars, or solitary “magnetars”, neutron stars with super strong magnetic fields ($\approx 10^{10} \sim 10^{11}$ T). In this paper we review the recent progress in the studies of AXP, and discuss the possible implications from comparison of AXP with other neutron stars, such as radio pulsars, radio quiet X-ray pulsar candidates and soft γ -ray repeaters.

Key words stars: pulsars—neutron stars—stars: magnetic field—stars: accretion—X-ray sources: stars