

γ 射线脉冲星 Geminga 的证认和性质

武占成* 陆 焱 宋黎明

(南京大学天文系, 南京 210080)

提 要

本文评述了高能γ射线脉冲星 Geminga 的发现、证认过程及其观测性质。探讨了脉冲星γ射线辐射的理论模型用来解释 Geminga 的观测事实时遇到的问题。

一、引 言

“Geminga”是一颗高能γ射线脉冲星的名字,来源于它是双子座(Gemini)的一个γ(Gamma)射线源,由“Gemin”与“ga”组合而成“Geminga”。在意大利米兰俚语中这个词的含义是“不存在”或“不在那里”。Geminga 是目前已被证认的少数几颗高能γ射线脉冲星之一,具有许多非常独特的观测性质。发现这颗星到现在的20年里,天文学家和天体物理学家对它的兴趣与日俱增,特别是1992年5月份以来,人们陆续发现了它的X射线脉冲性质和γ射线脉冲性质,激发人们全面地研究这颗奇特的脉冲星。这是一颗具有典型射电脉冲性质而却没有观测到射电辐射的γ射线脉冲星。到目前为止,没有一个理论模型能够全面地解释它的全部观测性质。对这颗星的进一步研究将会大大地促进脉冲星辐射理论的发展,对于天体物理学具有重要的意义。本文讨论了20年来人们对 Geminga 的认识过程,试图较完整地描述这颗星的观测事实,以及试图解释这颗脉冲星γ射线辐射的一些理论模型和存在的问题。

二、Geminga 的发现和证认过程

1. 发现

1972年,美国航空航天局(NASA)戈达德航天中心(GSFC)利用一颗小天文卫星(SAS-2)做巡天高能γ射线($h\nu > 35\text{MeV}$)观测^[1],在反银心方向观测到一个高能($h\nu > 50\text{MeV}$)γ射线源。这个源就是最近(1992年)证认的γ射线脉冲星 Geminga。

SAS-2 卫星的观测:1977年,Thompson 等人详细分析了 SAS-2 卫星观测的反银心方向高能γ射线数据^[2],给出源的坐标 $l = 195^\circ$, $b = +5^\circ$, γ光子流量($h\nu > 100\text{MeV}$)为 $(4.3 \pm 0.9) \times 10^{-6}$ 个光子($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), γ射线能谱比蟹状星云脉冲星(Crab)的谱硬,符合 π° 介

1993年1月3日收到。

* 河北师大物理系进修教师。

子衰变加韧致辐射源的谱或者谱指数为 1.9 的幂律谱(95%置信度)。根据这个方向上氢原子的柱密度和宇宙线的强度证明, 这个源的高能 γ 射线辐射不可能来源于宇宙线与物质的相互作用。

COS-B 卫星的观测: 1975 年, 欧洲天文卫星(COS-B)发射升空, 对空间 γ 射线源进行了更细致的观测。1981 年, Swanenberg 等将探测到的 25 个强 γ 射线源列入 2CG 星表^[3]。在 2CG 星表中, Geminga(2CG195+04)是第二强源, 流量($h\nu \geq 100\text{MeV}$)为 4.8×10^{-8} 个光子($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 源的位置 $l = 195^\circ.1$, $b = 4^\circ.2$ 的误差半径为 0.4(置信度 90%)。这个误差主要来源于 COS-B 卫星的观测仪器对光子入射方向判定的不确定性, 即仪器的角分辨能力。

2. 射电观测

1982 年, Sieber 和 Schlickeier 用剑桥 5km 综合孔径天线阵在 5GHz 的频率处对 Geminga 天区进行了射电探测, 共探测到 5 个射电源^[4], 认为最强的射电源 C630+180 是 Geminga 的射电对应体。由于 Geminga 位置的不确定性, 这个证认仍是可疑的。

1984 年, Spelstra 和 Hermsen 用荷兰韦斯特博克(Westerbork)天文台综合孔径射电望远镜(WSRF)在 21cm 波长处对 Geminga 天区进行了射电观测。在 Geminga 的误差范围($0^\circ.4$)内找到了 15 个射电源, 流量范围 4—50mJy, 他们分析了这些源的强度变化和谱特征^[5], 不能确定它们是否与 Geminga 有关。但在 X 射线源 E0630+178 的误差框($3''.2$)内, 几次观测均未发现射电源。从而得出 X 射线源 E0630+178 的射电流量的 3σ 上限为 0.5mJy。到目前为止, 人们仍未探测到 Geminga 的射电辐射。

3. X 射线证认

1979 年到 1981 年, Einstein 天文台对 Geminga 天区进行了三次 X 射线观测^[6], 其中两次用成像正比计数器(IPC), 一次用高分辨率成像器(HRI)。在 Geminga 的误差范围内发现了四个 X 射线源。其中三个源很弱, 接近探测器的极限。最强的一个 X 射线源 E0630+178 具有非常独特的性质, 其位置(天赤道坐标) $\alpha(1950) = 6^{\text{h}}30^{\text{m}}59^{\text{s}}.15$, $\delta(1950) = 17^\circ48'33''.0$, 误差半径 $3''.2$ (90%置信度)。这个误差来源于 HRI 定向的误差。这个源是不可分辨的, 是点源。就是说其周围没有同步加速云, 不存在超新星遗迹。源 E0630+178 的 X 射线谱很软, 光子能量主要集中在 0.2—1.0keV, 其 X 射线谱可以用黑体谱拟合, 拟合温度 $T = (9-11) \times 10^5\text{K}$; 也可以用幂律谱($3 < \alpha < 3.5$)或指数谱($0.1 \text{keV} < kT < 0.4 \text{keV}$)来拟合。无论采用哪种拟合, 允许的距离应小于 100pc。根据这些观测事实, Bignami 等提出 E0630+178 是 Geminga 的 X 射线对应体^[6]。这个证认后来证明是正确的。他们的工作首次在 γ 射线以外波段上找到了 Geminga 的对应体, 对认清这颗星的本质起了重要作用。他们的证认使 Geminga 的位置的不确定性由 $0^\circ.4$ 一下子减少到 $3''.2$, 使得对它的光学波段证认成为可能。Bignami 等还提出 Geminga 可能是类似于 Vela (船帆座脉冲星)的 γ 射线脉冲星。

4. 光学证认

Geminga 的光学证认经过了漫长而曲折的过程。1984 年, Caraveo 等用加拿大-法国-夏威夷(CFH)3.6 米望远镜对 X 射线源 E0630+178 进行了深 CCD(电荷耦合器件)观测^[7]。在 30 角秒² 的误差范围内发现了唯一的光学星(G), G 与 E0630+178 的角距离为 $4''.2$, 其

视星等为 $m_v = 21.3 \pm 0.2$ 。他们认为这颗光学星 G 是 E0630+178 的光学对应体。

进一步的观测发现,光学星 G 的红外光谱和光学光谱可以用黑体谱很好地拟合^[8],黑体温度为 5 400—6 000K,允许的 G 星最小距离为 1kpc,最小柱密度为 10^{21}cm^{-2} 。与 E0630+178 X 射线谱所确定的温度、距离比较,温度低一个量级、距离大一个量级。多次观测说明光学星 G 的自行上限为 $0''.5\text{yr}^{-1[9-11]}$ 。从统计学分析知,在 E0630+178 源位置的 $4''.2$ 范围内随机出现一颗 21 等星的概率为 16%,不能忽略^[12]。这些观测结果迫使人们放弃 X 射线源(Geminga 的 X 射线对应体)E0630+178 与光学星 G 的证认,指出光学星 G 是一颗距离大于 1kpc 的 G 型矮星。

1985 年, Sol 等根据欧洲南方天文台的观测发现,在距 G 星 $4''.4$ 处有一颗暗光学星 (G'),其视星等 $B = 24.3 \pm 0.3$,颜色蓝于 G,认为 G' 可能是 Geminga 的光学对应体^[9]。对 G' 的进一步观测给出其位置 $\alpha(1950) = 6^{\text{h}}30^{\text{m}}58^{\text{s}}.99$, $\delta(1950) = 17^{\circ}48'31''.6$,自行小于 $0''.3\text{yr}^{-1[8]}$ 。 G' 的光学波段流量为 $1.8 \times 10^{-15}\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1[12]}$ 。

1987 年, Bignami 等在 E0630+178 误差框内找到了另一颗更暗的光学星 (G''),其位置为 $\alpha(1950) = 6^{\text{h}}30^{\text{m}}59^{\text{s}}.0 \pm 0^{\text{s}}.5$, $\delta(1950) = 17^{\circ}48'32''.57 \pm 0''.5$,比 G' 至少暗一个星等^[8]。

1988 年, Halpern 和 Tytler 报告了光学星 G'' 与 X 射线源 E0630+178 的证认。通过对 5 米 Hale 望远镜观测 G'' 的数据进行三色光度分析,得出 G'' 视星等为 $g = 25.14\text{mag}$, $g-r = -0.32\text{mag}$ 。在红外波段未探测到 G'' ,得到 $g-i < 0.96\text{mag}$, G'' 是 X 射线源 E0630+178 天区内最蓝的一颗星^[13]。单从 G'' 的颜色来看,它对应于主序星中晚 A 型。但是,银河系内任何地方的 A 型主序星都亮于 G'' ,反银心方向上视星等暗于 25 等的主序星距离将超过 10kpc。 G'' 的星等和颜色决定了它与邻近所有其他星不同(其他星 $g-r$ 均大于零)。根据这些理由, Halpern 和 Tytler 认为 G'' 就是 X 射线源 E0630+178(很可能也是 Geminga)的光学对应体。观测发现, G' , G'' 均没有空间扩展,说明它们周围没有同步加速云。他们还预言 Geminga 是一颗 Vela 型的脉冲星^[13]。

1988 年, Bignami 等用欧洲南方天文台望远镜和暗天体摄谱仪,对 G'' 进行了长时间 V 波段和 B 波段观测,得到 $V = 25.37 \pm 0.2$, $B = 26.35 \pm 0.35$, $B-V \approx 1\text{mag} > 0$,说明 G'' 并不蓝。 G'' 的光学谱和 X 射线谱(E0630+178)无法用单个黑体谱来拟合^[14]。由此看来, G'' 的光学性质(谱,自行等)以及它与 Geminga 的证认有待进一步深入的观测。

5. 周期性探测

周期性探测对脉冲星的证认和性质具有非常重要的意义。1977 年, Thompson 等根据 SAS-2 的观测提出 Geminga 可能具有周期性,给出周期 $P = 59\text{s}$,周期变率 $\dot{P} = 2.2 \times 10^{-9}\text{s}\cdot\text{s}^{-1[2]}$ 。1984 年, Bignami 等分析了 Einstein 和 Exosat 观测到的 X 射线数据,认为 X 射线源 E 0630+178 具有周期性,给出 $P = 59\text{s}$, $\dot{P} = 4.68 \times 10^{-9}\text{s}\cdot\text{s}^{-1[15]}$ 。但这个结果可信度不高,被后来的观测所否定^[16]。Cheng 等曾根据外隙模型预言了 Geminga 是一颗周期为 $\sim 100\text{ms}$ 的中子星^[16]。

Rosat 卫星的观测:1992 年 3 月, Halpern 和 Holt 给出了他们 1991 年 3 月 14—17 日用安装在 Rosat 卫星上的位置灵敏计数器(PSPC)观测 Geminga 的结果,在总有效时间

14 390 s 内观测到能量为 0.07—2.4 keV 的软 X 光子 7 630 个。通过对所得数据进行快傅里叶分析(FFT), 用 262 144 个试验周期进行折叠, 当试验周期为 0.237097s 时出现峰值^[16]。

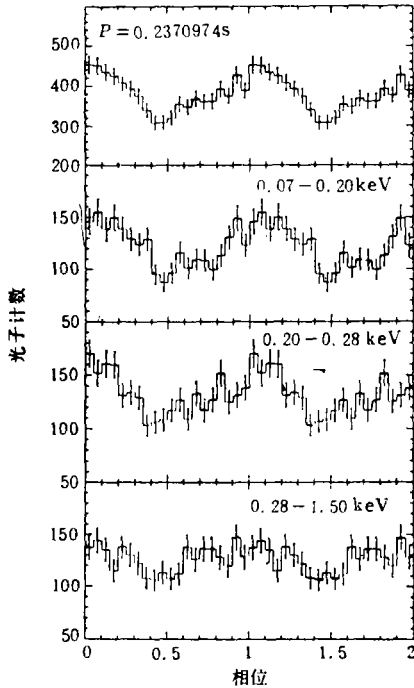


图 1 Rosat 卫星观测 Geminga X 射线相位图^[16]

在其他试验周期(包括 Bignami 等提出的 59s 周期)处均未探测到明显的周期信号。脉冲结构是单宽峰, 其相位图见图 1。脉冲成分所占的比例随光子能量的增加而减少, 在 0.07—0.2 keV 波段占 24%, 在 0.2—0.28 keV 波段占 19%, 在 0.28—1.5 keV 波段占 15%。E 0630+178 的 X 射线谱很软, 不能用单一温度的黑体谱拟合, 也不能用幂律谱拟合(见图 2), 但可以用 $T = (3-4) \times 10^5 \text{K}$ 的黑体谱加上幂指数为 0.75—1.75 的幂律谱来拟合。允许的柱密度为 $(0.5-3) \times 10^{20} \text{cm}^{-2}$, 对应的距离 $\leq 500 \text{pc}$ 。且给出 \dot{P} 的上限为 $2 \times 10^{-12} \text{s} \cdot \text{s}^{-1}$ 。X 射线(0.1—2.4 keV)总流量为 $1.5 \times 10^{-12} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Halpern 和 Holt 的工作在很大程度上证实了 Geminga 是类似于 Vela 的脉冲星, 使人们对 Geminga 的认识产生了重大突破, 也使得在 γ 波段上寻找 Geminga 的周期性成为可能。

Compton GRO 卫星的观测: 1992 年 4 月, Bertsch 等受 Halpern 和 Holt 工作的启发, 分析研究了 1991 年 4—6 月 Compton GRO 天文台的高能

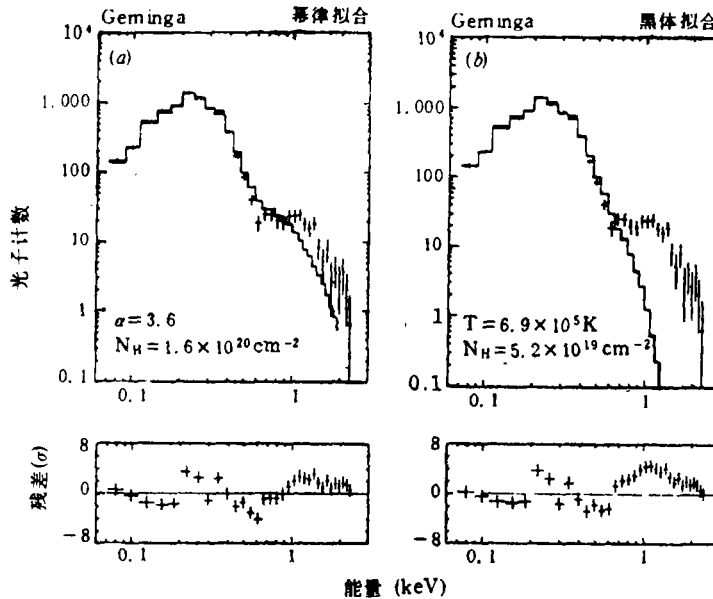


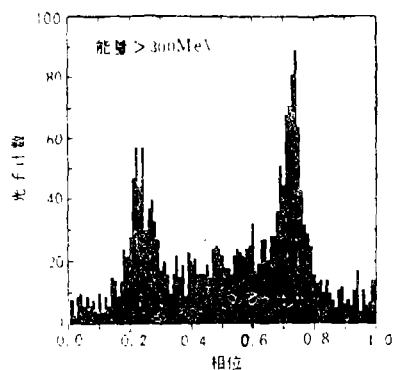
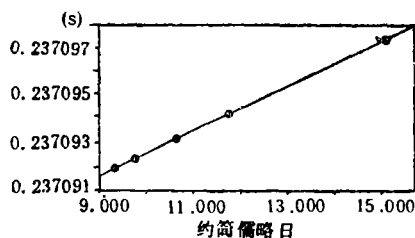
图 2 X 射线谱的幂律谱拟合(a)和黑体谱拟合(b)^[16]

γ 射线望远镜 (EGRET) 对 Geminga 观测所得数据。发现 Geminga 的 γ 射线辐射也具有周期性。当 $t_0 = \text{JD}(\text{儒略日}) = 2\,448\,400$ 时, $P = 0.237097453 \pm 0.000000063 \text{ s}$, $\dot{P} = (11.4 \pm 1.7) \times 10^{-16} \text{ s} \cdot \text{s}^{-1}$ 。脉冲结构是每个周期内有两个相间 0.5 ± 0.03 周期的窄峰, 见相位图(图 3), 但两峰的高度不同^[17]。他们所得的 P 和 \dot{P} 与 Halpern 和 Holt 的结果符合得很好, 使 Geminga 与 X 射线源 E0630+178 的证认得到了最后的证实。证实了 Geminga 确是一颗 γ 射线脉冲星。

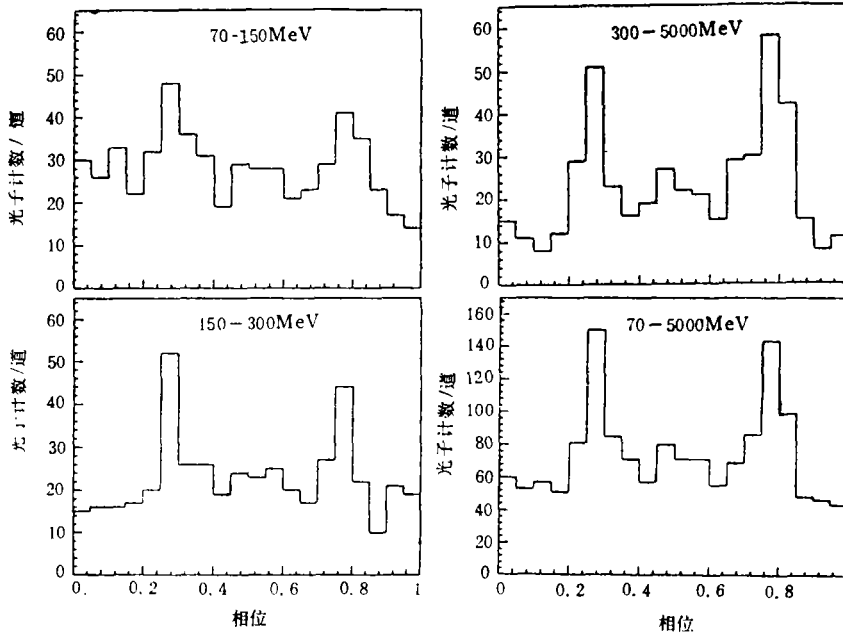
表 1 COS-B 观测 Geminga 的结果^[18]

观测序号	时 间	指向 (l, b)	相对效率	光子数	周期
00	75 08 17 75 09 17	186°, -6°	1.00	259	0.237091993
14	76 09 30 76 11 2	195°, +4°	0.97	564	0.237092385
39	79 02 22 79 04 03	190°, 0°	0.69	392	0.237093213
54	80 09 04 80 10 17	188°, -3°	0.47	244	—
64	82 02 18 82 04 25	190°, 0°	0.55	447	0.237094249

几周以后, Bignami 和 Caraveo 分析了 1975 年到 1982 年 COS-B 对 Geminga 观测的数据, 同样得到了 Geminga 的 γ 射线脉冲信号。几次观测所得到的结果如表 1 所示。且根据 COS-B 和 Rosat 数据找出了时间跨度为 16 年的周期随时间的变化关系, 发现与直线符合很好, 从而求出 $\dot{P} = (1.099 \pm 0.001) \times 10^{-14} \text{ s} \cdot \text{s}^{-1}$, 见图 4。

图 3 GRO 观测 Geminga γ 射线脉冲相位图^[17]图 4 COS-B 和 GRO 观测 Geminga γ 射线脉冲信号周期与时间的关系^[18]表 2 Geminga 的时间平均能谱特征^[19]

流量 ($10^6 \text{ ph} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	70—150 MeV	150—300 MeV	300—5 000 MeV	70—5 000 MeV	谱指数
F_P	0.62 ± 0.16	0.52 ± 0.10	1.17 ± 0.10	2.34 ± 0.20	1.3 ± 0.1
F_{total}	1.54 ± 0.26	0.76 ± 0.15	0.16 ± 0.14	2.46 ± 0.46	2.6 ± 0.3
F_P/F_t	0.28 ± 0.08	0.41 ± 0.09	0.88 ± 0.10	0.49 ± 0.06	

图 5 Geminga 的时间平均相位直方图^[19]

马宇倩等分析了 COS-B 卫星资料, 获得了与 Bignami 等结果一致的守时性参数的值。给出 Geminga 的时间平均能谱特性如表 2^[19]。其中 F_p , F_{np} 分别表示脉动成分, 非脉动成分的流量, $F_t = F_p + F_{np}$ 。他们还给出 Geminga 的时间平均直方图, 如图 5, 可以看出在较高能区第二峰相对提高。

三、Geminga 的观测性质

综合上述观测结果, 我们可以给出下面关于 Geminga 的观测事实:

位置 $\alpha(1950) = 6^{\text{h}}30^{\text{m}}59^{\text{s}}.15$, $\delta(1950) = 17^{\circ}48'33''.0$

周期 $P = 0.237097453 \pm 0.000000003 \text{ s (JD} = 2\,448\,400)$

周期变率 $\dot{P} = (1.099 \pm 0.001) \times 10^{-14} \text{ s} \cdot \text{s}^{-1}$

流量 $F_{\gamma} = 2 \times 10^{-9} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

$F_x = 2 \times 10^{-12} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

$F_{op} = 3 \times 10^{-16} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (对应 G'')

射电辐射未探测到。

光度比 $L_{\gamma}/L_x = 1\,000$

$L_x/L_{op} \approx 1\,700$

表面温度 $T = (3-12) \times 10^6 \text{ K}$

谱特征 γ 波段为 $\alpha \approx 1.9$ 幂律谱

X 波段为软 X 谱不能用单谱拟合

电子柱密度 $(0.5-3) \times 10^{20} \text{cm}^{-2}$

脉冲结构 γ 波段为双窄峰, 相差 0.50 ± 0.03

X 波段为单宽峰。

根据标准中子星模型(偶极辐射模型), 可以求得:

表面磁场 $B = 1.5 \times 10^{12} \text{G}$

自转能损失率 $\dot{E} = 3.5 \times 10^{34} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$

年龄 $\tau = 3.2 \times 10^5 \text{yr}$

距离 $D = 380 \text{pc}$ (若 \dot{E} 全转化为辐射能)

或 $D = 38 \text{pc}$ (若 1% \dot{E} 转化为辐射能)

由此可知, Geminga 是一颗离太阳系很近、具有强磁场、中等年龄的快速自转的中子星。

四、理论模型

快速自转中子星的 γ 射线辐射来源于加速到极高能量的带电粒子, 这要求在中子星磁层中存在一个加速区($\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \neq 0$ 区)。根据加速区的位置不同, 可以将 γ 射线脉冲星的理论模型分为内隙模型和外隙模型。

内隙模型认为加速区在极冠附近^[20], 加速后的带电粒子通过级联过程产生高能 γ 光子^[21]。在 ZLHLP^[22] 和 LS^[23] 模型中, 引入了基于电子对产生的 Hardee 机制的电子和光子的级联过程分代的概念。除了极个别的以外, 一般脉冲星的电子和光子只能进行到第二代

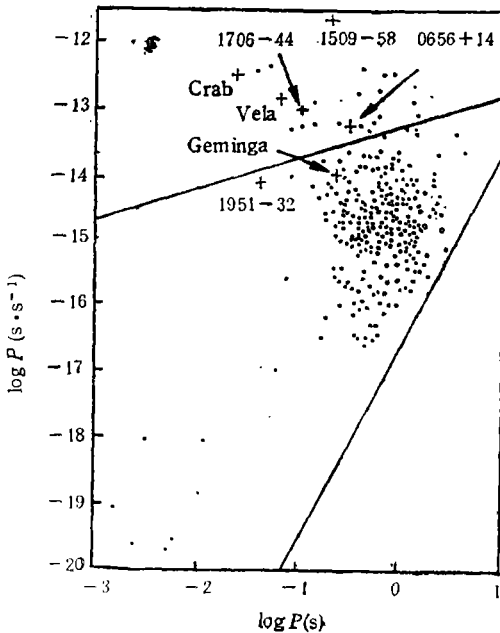


图 6 脉冲星的 $P-\dot{P}$ 图。上面较平的线划分两类脉冲星; 下面较陡的线为截止线, 此线以下不存在脉冲星^[23]

或第三代。由于一个电子可以进行很多次同步辐射, 所以高一代的光子数要比低一代的光子数增加许多倍(往往几十倍), 相应地光子的能量降低许多倍。由于 γ 射线的探测基于光子数的测量, 代数愈高的愈容易观测到 γ 射线脉冲, 所以, 能进行到第三代的脉冲星应有较高的比例成为 γ 射线脉冲星。只能进行到第二代的脉冲星, 除非离太阳系很近, 一般不容易观测到 γ 射线脉冲。这两类脉冲星之间的分界可以在 P 和 \dot{P} 图上用一条斜线表示(见图 6)^[23]。线以上是级联过程可以进行到第三代甚至更高的脉冲星, γ 光子能量较低, 流量较高, 是 γ 射线脉冲星的可能性较大; 线以下是级联过程只能进行到第二代的脉冲星, γ 光子能量较高, 流量较低, 只有极近的脉冲星才能被观测到 γ 射线脉冲。目前已经发现的 γ 射线脉冲星几乎都在线以上。有趣的是, Geminga 却在线以下, 其光子应是第二代光子, 能量比较高, 由此算

得其特征能量约为 700MeV, 与观测结果相符^[23]。其所以能被观测到 γ 射线脉冲, 也正是因为它离地球非常近。在这个模型中, Geminga 没有观测到射电辐射的问题尚待研究, 可能与存在吸收效应有关。

外隙模型认为加速区位于中子星磁层零电荷面到光速圆柱间的区域^[24-26]。在这个模型中, γ 射线辐射可以与射电辐射有不同的方向, 因而 Geminga 只观测到 γ 射线辐射而未观测到射电辐射可以简单地归之于几何因素。不过, 外隙模型的 γ 射线辐射存在一个上限周期 ($\approx 130\text{ms}$), Geminga 的周期已经超出了这个局限。能不能用外隙模型来解释 Geminga 的 γ 射线辐射, 是一个尚待研究的问题。

参 考 文 献

- [1] Fichtil, C. E. et al., *Ap. J.*, 198 (1975), 163.
- [2] Thompson, D. J. et al., *Ap. J.*, 213 (1977), 252.
- [3] Swanenberg, B. N. et al., *Ap. J.*, 243 (1981), L69.
- [4] Sieber, W. and Schlickeier, R., *Astron. Astrophys.*, 113 (1982), 314.
- [5] Spelstra, T. A. and Hermesen, W., *Astron. Astrophys.*, 135 (1984), 135.
- [6] Bignami, G. F. and Caraveo, P. A., *Ap. J.*, 272 (1983), L9.
- [7] Caraveo, P. A., Bignami, G. F., Vigroux, L. and Paul, J. A., *Ap. J.*, 276 (1984), L45.
- [8] Bignami, G. F., Caraveo, P. A., Paul, J. A., Salotti, L. and Vigroux, L., *Ap. J.*, 319 (1983), 358.
- [9] Sol, H. et al., *Astron. Astrophys.*, 144 (1985), 109.
- [10] Djorgovski, S. and Kulkarni, S. R., *Astron. Astrophys.*, 91 (1986), 90.
- [11] Kulkarni, S. R. and Djorgovski, S., *Astron. Astrophys.*, 91 (1986), 98.
- [12] Halpern, J. P., Grindlay, J. E. and Tytler, D., *Ap. J.*, 296 (1985), 190.
- [13] Halpern, J. P. and Tytler, D., *Ap. J.*, 330 (1988), 201.
- [14] Bignami, G. F., Caraveo, P. A. and Paul, J. A., *Astron. Astrophys.*, 202 (1988), L1.
- [15] Bignami, G. F., Caraveo, P. A. and Paul, J. A., *Nature*, 310 (1984), 464.
- [16] Herpern, J. P. and Holt, S. S., *Nature*, 357 (1992), 222.
- [17] Bertsch, D. L. et al., *Nature*, 357 (1992), 306.
- [18] Bignami, G. F. and Caraveo, P. A., *Nature*, 357 (1992), 287.
- [19] 马宇蓓等, 天体物理学报, 12 (1992), 390.
- [20] Ruderman, M. A. and Sutherland, P. G., *Ap. J.*, 196 (1975), 51.
- [21] Daugherty, J. K. and Harding, A., *Ap. J.*, 252 (1982), 337.
- [22] Zhao, Y. H., Lu, T., Huang, K. L., Lu, J. L. and Peng, Q. H., *Astron. Astrophys.*, 223 (1989), 147.
- [23] Lu, T. and Shi, T. Y., *Astron. Astrophys.*, 231 (1990), L7.
- [24] Cheng, K. S., Ho, C. and Ruderman, M., *Ap. J.*, 300 (1986), 500.
- [25] Ruderman, M. and Cheng, K. S., *Ap. J.*, 335 (1988), 306.

(责任编辑 刘金铭)

Identification and Properties of γ -ray Pulsar Geminga

Wu Zhancheng* Lu Tan Song Liming

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210008)

Abstract

The discovery, identification and observed properties of Geminga are reviewed in this paper. On the other hand, the problems of some theoretical models are discussed.

* Department of Physics, Hebei Normal University.