

Geminga 多波段研究的新进展

洪碧海^{1,2,3} 韩金林^{1,3} 乔国俊^{2,3}

(1. 中国科学院国家天文观测中心 北京 100012)

(2. 北京大学天文系 北京 100871)

(3. 中国科学院 - 北京大学联合北京天体物理中心 北京 100871)

摘 要

简要介绍了特殊天体 Geminga 的发现、认证、定位和距离测量等工作,详细综述了近年来有关 Geminga 低频射电辐射和高能辐射的观测进展以及人们对这些结果的理论解释。Geminga 是否代表一类没有射电辐射的射电脉冲星(辐射能由转动能量而来的非吸积型脉冲星),理论上具有重要意义。以前人们在高于 103MHz 的射电波段对 Geminga 做过多次高灵敏度观测,都没有测到有意义的信号。最近俄罗斯和印度的一些研究小组报告了他们在低于此频率的波段上的观测结果,认为 Geminga 存在低频射电脉冲,但其他一些研究者的观测结论却是相反的。因此这个问题还有待进一步的观测确认。关于 Geminga 的高能研究,近年也有很多新结果,包括其光学脉冲、由幂率成分和黑体成分构成的 X 射线谱、随脉冲相位变化的 γ 射线谱,以及新的守时残差等。守时残差呈现出一定的规律性,人们猜测这意味着 Geminga 可能存在一个行星。

关键词 脉冲星天文学: Geminga—射电辐射—高能辐射—X 射线辐射

分类号: P145.6

1 引 言

Geminga 是 20 多年前在 SAS-2 卫星第一次巡天观测中发现的第二亮 γ 射线源^[1]。由于当时 γ 射线望远镜定位精度不够,这个源的银道坐标粗略地定为 $l+b=195+5$,并被不太确定地取了多个名字,如 CG195+4, CG195.5+4.5, γ 195+5 等。正因为精度不够,当时在其他波段没能证认出它的对应天体,也没有探测到射电辐射^[2]。米兰的研究人员把这个在双子座(Gemini)中的不可见天体命名为 Geminga(在米兰方言中,“gh'e minga”意为不存在)。1983 年,在 X 射线波段它终于被证认为一个亮源^[3]。1987 年, Geminga 被证认为一颗 26 等星 G^{''}^[4,5]。

在 90 年代初 ROSAT 升空进行观测之后, Halpern 和 Holt^[6] 很快在 Geminga 天区观测到周期为 0.237s 的 X 射线脉冲。Bertsch 等人^[7]、Bignami 和 Caraveo^[8] 分别从 EGRET 存档数据中、COS-B 存档数据和 ROSAT 的新数据中得出 Geminga 的精确周期变率。至此, 人们认识到 Geminga 与 Vela 一样, 是一颗中子星, 其表面磁场为 $1.6 \times 10^8 \text{T}$, 特征年龄为 $3.4 \times 10^5 \text{yr}$ 。在这个脉冲周期上, Vishwanath 等人^[9] 在高于 10^{12}eV 的能段上从已有的观测数据中找到超高能 γ 射线脉冲。到 1996 年, Halpern 等人^[10] 又探测到 Geminga 的远紫外脉冲。

我国学者对 Geminga 也作了一些研究工作。1992 年, 马宇倩等人分析了 COS-B 卫星资料, 得到了 Geminga 的守时参数、能谱特性和时间平均直方图, 指出其高能辐射的双峰相位结构中, 在较高能区第二峰相对提高^[11]。Geminga 被证认为 γ 射线脉冲星之后, 武占成和陆垓等人对其发现、证认过程和观测特征做了评述, 并基于代参数理论指出 Geminga 的代参数为 2, 其 γ 射线光子能量较高, 但光子数较小, 属于不易观测到的 γ 射线脉冲星, 因其离太阳系较近而才被观测到^[12]。程凌翔和李惕培综述了 1993 年以前关于 Geminga 的研究工作^[13], 并对时间分析方法作了重点介绍。程凌翔等人通过比较 COS-B 观测中的 Geminga 脉冲星的 γ 射线绝对位相, 测量了它在不同时间所处的位置, 得到了这颗脉冲星的自行 (赤经分量为 $(226 \pm 30) \text{mas/yr}$)^[14], 其结果与后来哈勃望远镜的观测 ($(138 \pm 4) \text{mas/yr}$)^[15] 基本一致。1997 年, 张澍等人研究了 EGRET 和 COMPTEL 对 Geminga 的位相观测数据, 指出在 $10 \sim 30 \text{MeV}$ 能量范围内辐射能量主要集中在第一个峰^[16]。他们在稍后的工作中利用位相相关方法重新分析了 EGRET 对 Geminga 的四次长时间观测的数据, 得到了精确的守时参数^[17]。1998 年, 王仲翔和陆垓基于 Usov 和 Melrose 的修正极冠区内 Gap 模型^[18], 结合代参数理论^[19~23], 针对 Geminga 脉冲星射电辐射很弱的观测事实推断 Geminga 表面的多极场应该起重要作用^[24]。张冰等人也对如何理解 Geminga 与众不同的射电辐射特征作了尝试^[25,26], 这一点在 2.2 节中还将进一步介绍。

表 1 Geminga 主要参数^[47,85]

历元 $T_0(\text{JD})$	2446600
自转频率 f	$4.217705363081(13) \text{Hz}$
周期 P	$0.2370957461261(7) \text{s}$
频率对时间的一阶导数	$-1.9521712(12) \times 10^{-13} \text{Hz/s}$
周期变率 \dot{P}	$1.0974012(7) \times 10^{-14} \text{s/s}$
频率对时间的二阶导数	$1.49(3) \times 10^{-25} \text{Hz/s}^2$
周期对时间的二阶导数	$-8.3(2) \times 10^{-27} \text{s/s}^2$
表面磁场 B	$1.6 \times 10^{12} \text{T}$
自转能损率 \dot{E}	$3.5 \times 10^{27} \text{J/s}$
特征年龄 τ	$3.4 \times 10^5 \text{yr}$
距离 D	$157^{+59}_{-34} \text{pc}$
色散量 DM	$(2.9 \pm 0.5) \text{pc} \cdot \text{cm}^{-3}$
自行	$(138 \pm 4) \text{mas/yr}$

从理论上讲, 按照射电脉冲星高能辐射 (如 X 射线和 γ 射线等) 的外 Gap 模型^[27~29], Geminga 是一颗只有高能辐射而无射电辐射的脉冲星。但从分类上讲, 即使 Geminga 没有射电辐射, 它的性质仍类同于射电脉冲星^[30], 因为其辐射能量是星体转动提供的。这一点是

射电脉冲星与吸积型 X 射线脉冲星的重要区别, 后者的辐射能量是由吸积物质的引力势能转化而来的。人们曾认为 Geminga 是一类新型天体——无射电辐射的射电脉冲星——的代表, 并期待发现这一类型的其它天体。另一方面, 张冰等人^[24]从逆康普顿散射模型出发, 指出 Geminga 可能存在低频射电辐射。近年来一些学者报告说测到了 Geminga 的低频射电辐射, 但另一些观测工作则给出相反的结论。这样, Geminga 是否存在射电辐射就成为脉冲星研究中倍受关注的问题之一。

2 Geminga 的射电辐射

2.1 观测结果

从 γ 射线源 Geminga 发现以来, 人们对其射电辐射作过多次观测, 但都没有成功。1977 年, Bignami 等人最先用荷兰的综合孔径望远镜在 610MHz 的频率上作了系统的观测, 直到 0.015Jy 的极限流量都没有在 Geminga 位置上测到射电源^[2]。1981 年, Seiradakis 用德国的 100m 射电望远镜在 928MHz 的频率上对 Geminga 天区做了脉冲星搜寻, 周期搜寻范围是 0.2~4s, 流量密度极限低达 6mJy, 但也没有探测到脉冲星^[31]。在 COS-B 卫星提供更好的定位结果之后的 1984 年, Spelstra 和 Hermsen 又用荷兰的综合孔径望远镜在 1412MHz 的频率上以 0.5mJy 的灵敏度对 Geminga 天区作了更深的观测, 也没有找到 Geminga 的射电对应体^[32]。1985 年, Manchester 等人用 Parkes 64m 望远镜在 1.4GHz 的频率上在一些特殊目标(主要是超新星遗迹和 γ 射线源)中寻找年轻脉冲星, 也对 Geminga 天区作了观测, 至 1mJy 的灵敏度极限, 没有观测到任何周期大于 10ms 的脉冲星^[33]。即使在发现 Geminga 的高能辐射周期性并且确定它的中子星本质之后, 1992 年, Seiradakis 再次用德国 100m 望远镜在 1.41GHz 和 1.67GHz 两个频率上进行脉冲星搜寻, 分别观测了 80 和 85min, 灵敏度达到 1mJy, 依然没有肯定的结果^[34]。于是人们认为 Geminga 很可能是一颗没有射电辐射的高能辐射脉冲星。长期以来, 这一点是 Geminga 这颗脉冲星最与众不同而引人注目的特征, 如何理解这一点也就成了脉冲星研究中人们最为关心的问题之一。

1997 年情况出现了变化。Kuzmin 和 Losovskii^[35,36]宣布, 他们在 102MHz 的频率上用莫斯科郊区的 Pushchino 射电相位阵观测到了 Geminga 的射电脉冲。这一消息立即引起了很多天文学家的关注。早先的观测都是在高于 300MHz 的频段上进行的, 而他们的观测是在极低频率上做的。1992 年 Geminga 的 X 射线和 γ 射线脉冲周期性发现之后不久, 他们便开始用接收面积达 30000m² 的 200m×400m 的偶极子相位阵天线(属于俄罗斯科学院 Lebedev 物理研究所)在这个频段上记录 Geminga 的射电辐射。由于它不能对目标进行即时跟踪, 只能在中天时观测 3.5min。为了消除星际介质的色散效应, 他们使用了 32 通道滤波器组, 每通道带宽 20 kHz, 总带宽为 640 kHz。他们测得的流量大约为 0.1Jy。色散量 DM 为 $(3 \pm 1)\text{pc} \cdot \text{cm}^{-3}$, 由此求出的距离值基本上与以前的观测值相符。他们还声称测到了中间脉冲。

同一研究所的 Malofeev 和 Malov^[37]独立报告了他们在 102.5MHz 的频率上于 1996 年 12 月到 1997 年 5 月期间对 Geminga 射电脉冲观测的结果。总共观测了 37d, 每天 3.5min。他们根据 Geminga 守时参数预先算出了精确的脉冲到达时间。每天中天时间用他们的多通道探测器记录 954 个个别脉冲, 去掉一些干扰通道, 折叠后得到了脉冲轮廓。但他们发表的脉冲轮廓的信噪比仍然特别低。他们认为 5 个时段中获得的脉冲的位相基本一致, 已足以证明存在脉冲信号。

他们得到色散量平均值为 $(2.9 \pm 0.5) \text{pc/cm}^3$ 。他们得到的平均流量约为 60mJy ($\sigma \approx 95 \text{mJy}$)，并认为流量因星际闪烁而变化，且不排除内秉变化的可能性。他们所用的大相位天线阵只使用一个线偏振分量，不能判断 Geminga 辐射的偏振特性。根据其它射电频率上观测得到的脉冲流量上限 (如 610MHz ， 1.4GHz ， 1.67GHz 等) 估算出 Geminga 射电谱指数 $\alpha > 1.6$ 。

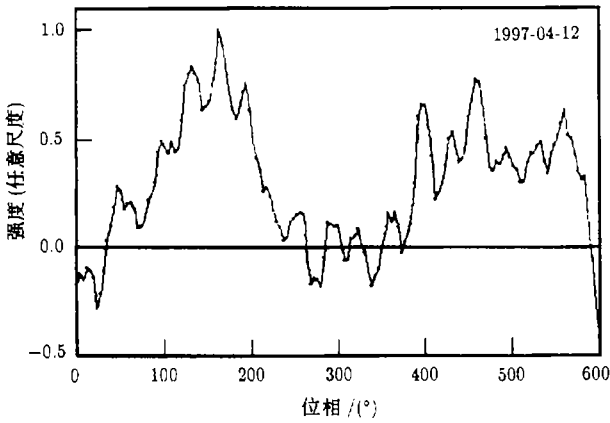


图 1 Geminga 的射电脉冲轮廓^[37]

该研究所另一个研究组 Shitov 和 Pugachev^[38,39] 又独立报告了他们在 1992、1993 和 1996~1997 年三个时段用同一设备即 Pushchino 射电天文台的相位阵对 Geminga 在 102.5MHz (带宽为 3MHz) 的频率上的观测结果。他们主要检测信号的周期性，得到了与 Geminga 转动周期相似的周期特征，全部数据叠加后功率谱在 Geminga 转动频率上有一尖峰。他们测得平均流量 $S_{102} = 8_{-2}^{+3} \text{mJy}$ ，色散量 $DM = (3.2 \pm 0.3) \text{pc} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。他们得到的流量值与 Kuzmin 和 Losovskii^[35,36] 所得的

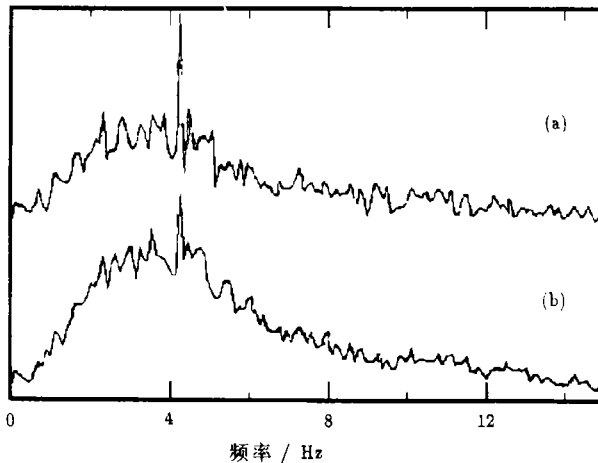


图 2 Geminga 的射电观测平均功率谱^[39]

曲线 a 由信噪比较高的 8 个最好结果叠加而得，曲线 b 由 33 个观测结果叠加而得

流量相差很大。

1997 年 7~10 月期间，Shitov 和 Malofeev^[40] 对 Geminga 在 41MHz 和 61MHz 两个频率上作了观测，也声称测到了射电脉冲。在两个频率上的脉冲半宽均达半个周期左右。 41MHz 的流量约为 300mJy ，谱指数大于 2.5。如果推算到 102.5MHz 的频率，平均流量应该小于 30mJy 。

Vats 等人^[41,42] 报告了用位于印度 Rajkot 的 5000m^2 望远镜在 103MHz 的频率上观测到 Geminga 有周期为 0.237s 的射电脉冲。他们还证实了 Kuzmin 和 Losovskii 的观测，测到在与

主脉冲相位差 0.5 个周期处有一个中间脉冲。

上述报告都说独立测到了 Geminga 的射电脉冲信号, 色散量大体一致, 但脉冲形态和流量有些区别。时至今日, Geminga 是否存在低频射电脉冲仍是有争议的, 主要原因是观测信噪比比较差。有一些研究者发表了他们自己对 Geminga 的观测工作, 得出与上述报告不同的结论。

1998 年, Ramachandran 等人^[43] 分别用 Gauribidanur 望远镜和 Ooty 射电望远镜对 Geminga 在 35MHz 和 327MHz 两个频率上进行了观测, 似乎没有测到可信的脉冲信号。Gauribidanur 望远镜位于印度南部, 地处北纬 13.6°。这个偶极子 T 字型天线阵的东西臂总接收面积为 16000m², 而接收机中心频率为 34.5MHz, 带宽为 1MHz。观测数据处理所得的波形大多没有显示出明显的周期结构。虽然他们发表的一个 34.5MHz 数据折叠结果看起来有点像脉冲轮廓, 但他们认为没有明显的理由排除系统噪声产生这种结果的可能性。Ooty 射电望远镜抛物面的有效接收面积约为 8000m², 系统温度典型值为 200K(接收机温度 T_{rec} + 天空温度 T_{sky}), 中心频率为 327MHz, 带宽约为 10MHz。由于馈源天线阵的偶极子是南北方向排列的, 这个望远镜对东西方向的偏振分量是不敏感的。他们观测了 6h, 完全没有测到脉冲。他们在两个频率上得到的流量上限分别是 75 ~ 100mJy 和 0.2 ~ 0.3mJy, 因此认为 Geminga 在这两个频率上是射电宁静的。他们对 Malofeev 和 Malov 在 102MHz 频率处的观测结果^[39,40] 表示难以理解。如果 102MHz 处的流量 $S_{102} = (60 \pm 95)\text{mJy}$, 平均为 60mJy, 谱指数假设为 -2, 那么 327MHz 的平均流量应该大于 6mJy, 但他们测到的流量极限只有 0.2mJy。即便考虑到脉冲信号可能会因星际闪烁的影响而产生时标为 1h 的波动, 也难以消除这个矛盾, 因为在长达 6h 的观测中, 这颗脉冲星一直处于低流量状态的可能性很小。他们猜测, 也许 102MHz 的辐射锥正好扫过观测视线, 而 35MHz 和 327MHz 的辐射锥则与视线相错, 于是产生了在这些频率上的相反观测结果。

针对已有的射电辐射正观测结果, Burderi 等人最近利用最新 Geminga 的周期和周期变率参数对 Arecibo 射电望远镜 1982~1984 年期间在 318MHz、430MHz 和 1400MHz 等频段的观测数据进行重新分析, 结果全是否定的^[44]。这意味着, 如果俄罗斯研究者的观测结果是正确的话, Geminga 的射电幂率谱必须非常陡, 谱指数约为 -7.3 至 -3.6。这样陡的谱是不寻常的。Burderi 等人评述说, 虽然 Geminga 低频射电脉冲的发现使其射电宁静的奇异性不复存在, 却使它因为有了一个极陡的幂率谱而变得更加奇异。

在对 Geminga 射电脉冲的观测结果发表之后, McLaughlin 等人^[45] 重新检查了对 Geminga 的一次低频快速取样的 VLA 长时间观测结果, 以 95% 的置信度得出 Geminga 的 317MHz 流量上限为 3mJy。他们指出, 可能存在一种时标远比他们的观测取样时间短的星际闪烁机制对 Geminga 的射电辐射产生影响。他们还结合俄罗斯和印度在 102MHz 上观测到的射电流量值算得 Geminga 谱指数下限为 -2.7。

最近, 美国 VLA 安装了 74MHz 的接收机。我们原来计划申请 VLA 的观测时间对 Geminga 的射电辐射进行完全独立的观测。但前不久了解到美国海军实验室的 Kassim 博士已经在接收机试验阶段对 Geminga 天区作了 74MHz 和 327MHz 两个频率的 8h 深度观测, 结果也没有测到 Geminga 的低频射电辐射^[46]。按照他们的结果, Geminga 在 74MHz 上的流量肯定低于 20mJy。

作为小结, 在表 2 中列出迄今为止对 Geminga 的射电辐射所作观测的主要结果。

表 2 Geminga 射电辐射观测结果

时间	观测者及文献	望远镜	观测频率 /MHz	流量 /mJy	结论 **
1977	Bignami 等人 [2]	荷兰综合孔径望远镜	610	15*	-
1981	Seiradakis ^[31]	德国 100m 射电望远镜	928	6*	-
1984	Spelstra 和 Hermsen ^[32]	荷兰综合孔径望远镜	1412	0.5*	-
1985	Manchester ^[33]	澳洲 Parks 64m 望远镜	1400	1*	-
1992	Seiradakis ^[34]	德国 100m 射电望远镜	1410	1*	-
1992~1997	Kuzmin 和 Losovski ^[35,36]	俄国 Pushchino 射电阵	102	≈100	+
1996.12~1997.5	Malofeev 和 Malov ^[37]	俄国 Pushchino 射电阵	102.5	≈60	+
1992,1993,1996~1997	Shitov 和 Pugachev ^[38,39]	俄国 Pushchino 射电阵	102.5	8_{-2}^{+2}	+
1997.7~1997.10	Shitov 和 Pugachev ^[40]	俄国 Pushchino 射电阵	41, 61	≈300	+
1997, 1999	Vats ^[41,42]	印度 Rajkot 射电望远镜	103		+
1998	Ramachandran ^[45]	印度 Gauribidanur 望远镜	35	75 ~ 100*	-?
		印度 Ooty 望远镜	327	0.2*	-
1999	Burderj ^[49]	美国 Arecibo 射电望远镜	318, 430, 1400		-
1999	Mclaughlin ^[45]	美国 VLA	317	3*	-
1999	Kassim ^[46]	美国 VLA 74MHz 接收机	74	56(2 σ)*	-
			326	5(2 σ)*	-

注: * 表示所列数据为流量上限值.

** 结论指是否有射电辐射. + 表示肯定, - 表示否定.

2.2 对射电观测结果的解释

人们很容易想到 Geminga 的射电宁静特性可能是因为射电辐射束并不扫过地球. 这只是一种可能但远非充分的解释. Halpern 和 Ruderman^[47] 认为 Geminga 本身可能就没有射电辐射; 即使有, 至少其射电流量也是所有脉冲星中最小的. Geminga 的射电流量与 X 射线或 γ 射线波段的流量之比值比一般的脉冲星至少要小好几个量级. 比如, Vela 脉冲星 (PSR 0833-45) 的高能脉冲轮廓与 Geminga 很像^[48], 但 Geminga 的上述比值比 Vela 的小了 3 个量级. Geminga 射电辐射的低亮度也许是因为在脉冲星附近存在射电辐射的吸收机制. 也有人认为, Geminga 磁层的物理条件可能比较特殊, 使得射电相干系数太小而不能产生足够的亮度. 但相干性对于脉冲星的射电辐射并不是必不可少的^[49], 因此这个观点并不充分. 虽然新近低频射电辐射观测结果尚有争议, 但一些学者已根据 Geminga 的特殊性提出了一些可能的解释.

Malov^[50] 用同轴转子在光速圆柱附近的同步辐射来解释 Geminga 的低射电光度. 他以 0.1s 为界限将脉冲星分成长周期脉冲星和短周期脉冲星两类, 并认为短周期脉冲星的辐射区位于光速圆柱附近. 根据 Geminga 的统计特性, 它大致可以看作一颗短周期脉冲星 (尽管 Geminga 的周期为 0.237s). 他认为, 在脉冲星磁层里存在着两种电荷成分, 即相对论因子高达 10^7 的高能电子成分和作为二级粒子的正负电子对成分, 后者的相对论因子约为 3. Geminga 的全部转动能量等量地转化为这两种粒子成分. 高能成分电子通过同步辐射产生 γ 射线和 X 射线辐射, 其峰频为 3.8×10^{21} Hz, 相当于 16MeV. 他得到的 γ 射线光度公式为 $L = 1.40 \times 10^{31} \sin^6 \beta$ (J/s), 其中 β 是脉冲星的磁倾角. 与观测到的 γ 射线光度 $L_\gamma = 10^{26}$ J/s^[40] 比较, 他定出 Geminga 的磁倾角约为 8° , 因而认为 Geminga 是一个近似同轴转子. 他认为低频

射电脉冲是低能粒子成分通过同步辐射产生的, 峰频约为 100MHz, 光度 $L = 1.6 \times 10^{19} \text{J/s}$, 转化效率很低, 约为 10^{-8} 。这与观测结果相符。射电流量将随频率的升高以指数形式迅速地衰减, 这也与 Geminga 射电波段光度很低甚至无法探测到的观测事实相符。Geminga 射电脉冲不容易探测到的另一个原因也许是它的磁倾角很小。

Gil 等人根据射电波在接近光速圆柱的地方因与 e^\pm 等离子体发生回旋共振而受到阻尼吸收的物理机制来解释 Geminga 的射电辐射特性^[51]。他们假设 (1) Geminga 是一个磁倾角很小的近似同轴转子; (2) 视线从辐射区的边缘掠过; (3) 射电辐射在位于脉冲星表面附近的极冠区产生。能够逃逸出磁层的射电辐射的频率是由磁层内辐射传播路径上吸收区的磁场所决定的。吸收频率可用公式表示为:

$$\omega_d = 2\omega_B / (\chi^2 \gamma)$$

其中 ω_d 是被吸收辐射的圆频率下限。 ω_B 是电子回旋频率, χ 是电磁波与磁场的夹角, γ 是吸收区的带电粒子的相对论因子。此式也可用脉冲星的特征量表示为:

$$\nu_d = 6 \times 10^3 \dot{P}_{-14}^{0.5} P_{0.237}^{-2.5} / (R^3 \sin \alpha \chi^2 \gamma) (\text{MHz})$$

其中 ν_d 是脉冲星的频率吸收限, \dot{P}_{-14} 和 $P_{0.237}$ 是周期变率和周期值, 分别以 10^{-14}s/s 和 0.237s 为单位, $R = r/R_{\text{LC}}$, 而 r 为视向距离, R_{LC} 是光速圆柱半径, α 是磁倾角。因为磁倾角很小, 所以当射电波到达光速圆柱附近时已经离中子星相当(高)远, 而磁场与这个距离的三次方成反比, 所以吸收区磁场已经很小并导致 ω_B 很小。他们的计算表明, 吸收区的回旋共振频率正好是 100MHz 左右, 因而认为能够解释射电辐射的观测特征。

张冰等人^[25,26]研究了脉冲星内间隙(Gap)的形成及其模式问题, 并考查了高能粒子在 Gap 之外的能量衰减问题。他们在这个框架上对 Geminga 的射电观测特征作了尝试性的解释。他们研究发现, 因 Gap 区内相对论电子和热光子逆康普顿散射而使内 Gap 存在着两种模式, 即“谐振模式(Resonant ICS Gap)”和“热峰模式(Thermal ICS Gap)”。年轻脉冲星一般以谐振模式为主, 而年老脉冲星和毫秒脉冲星一般以热峰模式为主。他们假设中子星磁场是多极场, 计算了高能粒子逸出内 Gap 后洛伦兹因子随高度的衰减曲线。他们发现相对论电子在离中子星表面很近的区域内(约 0.01 ~ 0.1 倍中子星半径)因与极冠区高温光子发生谐振逆康普顿散射而导致洛伦兹因子的剧烈衰减, 然后经过一个约几倍到十几倍中子星半径长的洛伦兹因子稳定平台, 之后又因与中子星整体的热光子场发生谐振逆康普顿散射而使其洛伦兹因子发生第二次猛烈衰减。根据脉冲星射电辐射的逆康普顿散射模型(ICS)^[52~55], 脉冲星的射电辐射是内 Gap 放电时产生的低频波在几倍到十几倍中子星半径的高度处(正好是洛伦兹因子的稳定平台)与高能电子发生逆康普顿散射而产生的。他们分别对 ICS 模型和曲率辐射模型产生可观测射电辐射的高能电子能量阈值给出了相应的洛伦兹因子曲线。对这个阈值曲线和衰减曲线的比较表明, 曲率辐射的阈值几乎总是高于衰减平台, 因而实际上不可能通过这种机制产生射电辐射。而逆康普顿散射的阈值则常常在上述平台以下, 表明这是一种产生射电辐射的有效机制。他们计算了不同极冠温度下 Geminga 的衰减曲线和 ICS 模型的阈值曲线, 发现温度较高(但低于临界温度)时, 衰减曲线平台低于阈值曲线, 因而不会观测到射电辐射, 而温度足够低时, 衰减曲线平台能略高于阈值曲线, 这样就会观测到射电辐射。这时对应的出射射电频率正好在 100MHz 附近, 与最近的观测结果一致。在更高的频率上,

阈值曲线将高于衰减平台,因而不能产生射电辐射。这是对 Geminga 最新射电观测结果的又一种合理解释。

McLaughlin 等人^[45]则明确提出可能存在一种新的脉冲星品种,即所谓的射电宁静 (radio-quiet) 或射电弱 (radio-weak) 的 Geminga 型脉冲星。Geminga 只是其中的一颗。射电宁静或弱的原因既可能是物理的也可能是几何的。从物理上说,在内磁层区域电子对的大量产生可能会扑灭脉冲星的射电辐射^[47],而从 Geminga 的软 X 射线的脉冲轮廓上的暂现谷^[56]可以推知向内磁层区提供正负电子对的过程是随时间变化的,这样正负电子对的产生对射电辐射的扑灭作用也就随时间变化。这暗示了 Geminga 应该是一个暂现的射电辐射源,也许这能够解释存在于不同观测之间较大的不一致性。从几何上说,脉冲星的射电辐射锥和 γ 射线辐射锥可能不重合,如果观测视线只扫过 γ 辐射锥而不扫过或只略微扫过射电辐射锥,脉冲星就表现为射电宁静或射电弱的高能脉冲星。Romani 和 Yadigaroglu^[57]指出,因为 γ 辐射锥比射电辐射锥更宽,约有 45% 的年轻脉冲星只能在高能段被探测到,而只有 19% 的年轻脉冲星既能测到 γ 射线辐射也能测到射电辐射。按这个比例,对应于 EGRET 探测到的 5 个射电脉冲星,应该有 12 个射电宁静的 γ 射线脉冲星。这暗示了 EGRET 探测到的 20 个未证认的源应该是 Geminga 型的射电宁静或射电弱的高能脉冲星。这些源的其他特性如流量的时间可变性、谱指数等也与已知的 EGRET 脉冲星类似。因此,按照 McLaughlin 等人的观点, Geminga 代表了一类新的脉冲星,而不是特立独行的奇异个体。这一观点有待于在对 EGRET 源的证认中进行检验。

3 光学辐射的观测

Geminga 光学观测的新进展主要是在哈勃望远镜上完成的,包括精确的位置测量,能谱观测和光学脉冲观测。我们首先简要介绍一下过去的光学观测工作。

1983 年, Bignami 等人在爱因斯坦天文台卫星发现 Geminga 的 X 射线对应体 1E 0630+178 之后,利用高达 3" 的定位精度开始寻找它的光学对应体,提出一颗 $m_v \approx 23\text{mag}$ 的蓝星为候选对应体^[3]。此星的 X 射线光度与光学光度的比值大于 1000。Caraveo 等人^[58]和 Sol 等人^[59]提出 $m_v \approx 21\text{mag}$ 的另一颗星为候选对应体,后来被否定^[60~62]。Bignami 等人 1987 年提出, Geminga 的对应体可能是亮度约为 24.5mag 的 G' 和大于 25.5mag 的 G'' 这两颗更暗的星^[4]。Halpern 和 Tytler 在对 1E 0630+178 所在天区作了深度光学观测之后又否定了 G' 并确定 G'' 是真正的光学对应体^[63]。1988 年, Bignami 等人测定了 G'' 的 B 波段星等,认为比原来的值更大,达到 $(26.5 \pm 0.5)\text{mag}$,并根据多色测光光谱的拟合结果推论 G'' 可能是一颗磁化中子星^[5]。这在 1998 年为哈勃望远镜的观测所证实。

对 Geminga 的距离测定一直是人们关心的工作,因为确定一个天体的距离是了解这个天体的物理本质的重要一步。1983 年, Bignami 等人根据 X 射线微弱的星际吸收推算出距离大约为 100pc^[3]。1993 年发现了 G'' 的自行很大,使之和 Geminga 的对应关系得到肯定^[64]。1995 年,程凌翔等人通过 Geminga 的自行测定确认了 G'' 与 Geminga 的对应关系^[14]。1996 年, Caraveo 等人^[15]分析了哈勃空间望远镜三次观测的资料,测定了 Geminga 的自行 $((170 \pm 6)\text{mas/yr})$ 和视差 $(0''.0064 \pm 0''.0017)$ 。由此导出比较精确的距离为 157^{+59}_{-34}pc 。至此, Geminga 的距离不确定性大为降低。Geminga 被确定为离我们最近的中子星之一。俄罗斯射

电观测得到色散量平均值为 $(2.9 \pm 0.5) \text{pc} \cdot \text{cm}^{-3}$, 并由此算出其距离约为 $(155 \pm 30) \text{pc}$ 。这与光学视差测量得到的距离值基本一致。

Geminga 的光学能谱并不能由软 X 射线热谱外推给出。在 V 波段有一个峰^[5,65]。这个结论得到 Mignani 等人发表的 HST/FOC 宽波段测光数据的有力支持^[66]。人们最初用热的连续谱上叠加因质子回旋辐射导致的 V 波段增强及 B 和 I 波段的吸收来解释 Geminga 的光学谱。Martin 等人观测了 Geminga 的光学谱^[67] 并发现它在 $3700\text{\AA} \sim 8000\text{\AA}$ 之间是幂律谱, 谱指数约为 0.8, 而在 $6300\text{\AA} \sim 6500\text{\AA}$ 之间有一条很宽的吸收线。他们认为这种辐射特征可以用电子同步辐射加上离子的回旋吸收来解释, 或者用离子在 10^7T 的磁场中的回旋辐射来解释。

Geminga 的光学脉冲是在 1998 年发现的。Shearer 等人利用 3.55m 的新技术望远镜以及特别天体物理天文台的 6m 望远镜对 Geminga 的高时间分辨率光学观测结果, 分析出其光学对应体 G'' 在 B 波段可能具有周期为 0.237s 的脉冲^[68]。光学脉冲轮廓与 γ 射线脉冲很相似, 有两个峰, 位相差约半个周期。脉冲部分星等约为 $(26.0 \pm 0.4) \text{mag}$, 而非脉冲部分 B 星等不会亮于 27mag。这些特征表明光学辐射的大部分是非热的。他们认为光学脉冲只是 γ 射线脉冲的延伸而已。

4 高能辐射的观测及解释

Geminga 的高能辐射研究比较深入, 成果也比较丰富, 是 Geminga 研究中最重要的一部分。下面介绍 Geminga 高能辐射的观测和研究进展。

4.1 γ 射线辐射的观测进展

1991 年 CGRO 升空之后对 Geminga 的 γ 射线辐射作了系统的观测, 对从几十 MeV 到 10GeV 的 γ 射线光子作了累积计数以缩小误差, 并且测量了软 γ 射线的能谱和光变^[66]。1992 年, Halpern 和 Holt 探测到软 X 射线源 1E 0630+178 的 237ms 周期脉冲^[6] 之后, Bertsch 等人分析了 CGRO 的 EGRET 设备的 γ 射线数据, 最终找到了 Geminga 的 γ 射线脉冲, 不仅再次确认 Geminga 和 1E 0630+178 的对应关系, 而且终于使人们认识到 Geminga 与 Vela 一样, 是一颗 γ 射线脉冲星^[7,8]。他们当时给出了这颗脉冲星的一些重要参数: 周期变率 $\dot{P} = (11.4 \pm 1.7) \times 10^{-15} \text{s/s}$, 磁场 $B = 1.6 \times 10^8 \text{T}$, 特征年龄 $\tau = 3 \times 10^5 \text{yr}$, 转动能损率 $\dot{E} = 3.5 \times 10^{27} \text{J/s}$ 。脉冲轮廓中具有非常明显的双峰结构, 双峰之间位相差几乎正好为 180° , 其间还有被称为 bridge 的较弱辐射成份。存在 bridge 辐射成份是 γ 射线脉冲星的典型特征, 但其它 γ 射线脉冲星的 bridge 光子硬度比两峰的高, 而 Geminga 的 bridge 光子硬度虽

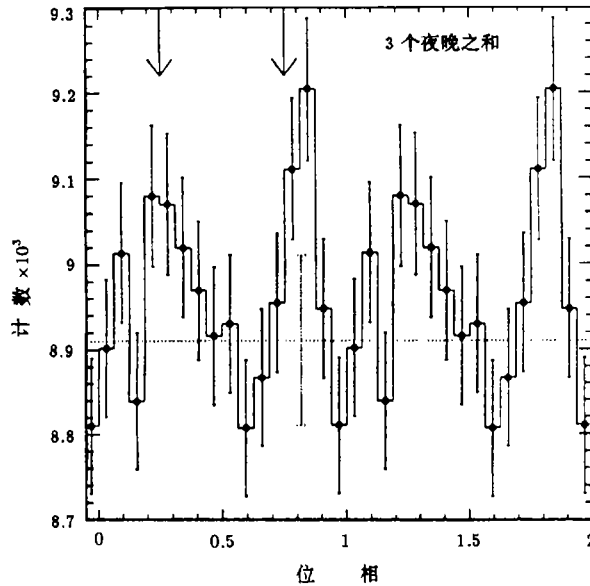


图 3 Geminga 的光学脉冲轮廓^[68]

图上方的箭头表示 EGRET 脉冲轮廓中两个峰的位置。

虚线表示背景信号水平及其误差

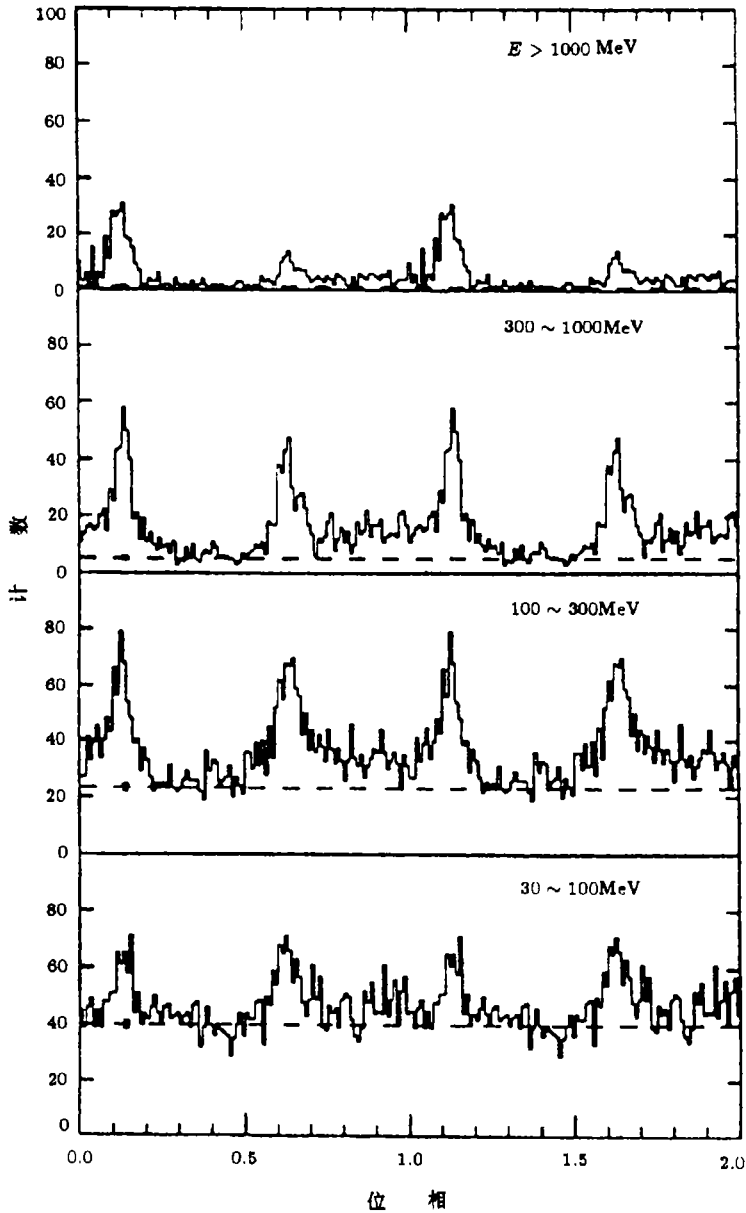


图4 从EGRET数据中得到的不同能段脉冲轮廓^[69]

图中不同峰之间的差异和峰之间的辐射很明显

比主峰高，却低于第二个峰^[48]。1988年，Fierro等人对Geminga做了不同相位上的 γ 射线分析，发现它的谱指数在不同相位上有很大差别，其硬度与脉冲轮廓有相关性^[70]。

解释 γ 射线脉冲星高能辐射的理论模型可以分成两大类：极冠区加速模型^[71,72]和外磁层真空Gap加速模型^[27~29]。前者认为，在极冠区中的初级电子被强烈加速，能量达到约

10^{13}eV , 然后通过曲率辐射产生高能光子, 这些光子在强磁场中被吸收产生次级电子对, 次级电子对通过同步辐射机制产生实际观测到的高能辐射。为了解释 Geminga 高能辐射的双峰 180° 相位差, 这个模型最初假设磁倾角约为 90° , 认为两个峰分别来源于两个磁极的极冠区。但 180° 相位差是 Geminga 特有的行为, 其它高能脉冲星的双峰相位差都小于 180° ^[48]。因此这个模型完全不能解释其它 γ 射线脉冲星的非 180° 相位差, 也无法解释普遍存在的 bridge 辐射成份。在改进后的极冠模型^[73~76]中, 假设了高能辐射来自单个磁极的极冠区, 而辐射束是一个中空的锥, 以此来解释高能辐射的双峰结构和 bridge 成份, 也自然地得到了 bridge 硬度比两个峰大的普遍结果, 但如前所述, Geminga 的硬度与此不符, 需作进一步研究。磁倾角则被假设为很小以解释双峰之间的大相位差, 只要采用适当的磁倾角值就可以得到 Geminga 的 180° 相位差。这个小磁倾角假设与最近的低频射电脉冲观测结果的推论(详见本文 2.2 节关于射电辐射的解释)一致。

极冠区加速模型还有一个重要问题值得指出。在这一大类模型中, 对极冠区物理状况有两种截然不同的处理方式。一种是假设极冠区中带电粒子可以自由地流出中子星表面^[77]。另一种则认为带电粒子不能自由逸出中子星表面, 极冠区因而会形成真空 Gap, 磁层中的所有带电粒子都是 γ 光子被吸收而产生的。后者以 RS 模型^[78]为代表。虽然在这两种模型中, 由相对论粒子带入磁层的能量是几乎相同的因而所得的 γ 光度也是一致的, 但在与 X 射线光度的比较上, 两者有明显的区别。根据 RS 模型, 由带电粒子携带进入磁层的能量和回流到中子星表面的能量是大体相等的。回到中子星表面的能量大部分通过极冠加热机制以 X 射线重新辐射出去, 而进入磁层的能量只有一部分能以 γ 光子的形式逸出, 因而 γ 光度不应比 X 射线光度大。但观测事实是, Geminga 的 γ 光度比其 X 射线光度高三个量级, 因此 RS 模型在这个问题上与观测事实不符。1993 年, Harding 等人^[79]基于 Arons 模型^[77]计算了高能脉冲星的 γ 光度和 X 射线光度, 并假设 Geminga 的距离小于 50pc 算得其 γ 光度为 $L_\gamma \approx 10^{25}\text{J/s}$, X 光度 $L_X \approx 5 \times 10^{21}\text{J/s}$, $L_\gamma/L_X \approx 2 \times 10^3$, 基本上与观测结果一致。他们还在这个模型的框架中考虑了 Geminga 的 X 射线辐射双温度成分, 认为这颗脉冲星的软硬 X 射线光度比的理论值也与观测结果一致。但在这个计算中, Geminga 的距离是一个很勉强的假定, 其值比现在比较精确的测定值 157pc ^[15]的 $1/3$ 还小, 因而其计算仍然是不够可靠的。在外 Gap 模型中, 中子星磁层中存在着从表面一直延伸到光速圆柱附近的薄扇形真空 Gap, 电子对在这个 Gap 中被加速到高能, 又通过逆康普顿散射、同步辐射以及光子之间的相互作用等多种机制产生各个能段的光子。这个模型认为 γ 射线脉冲星的高能辐射正是在这个薄 Gap 中产生的。虽然此模型能够解释 Crab 和 Vela 这两个脉冲星的部分观测结果, 但随着 γ 射线脉冲星观测资料的不断积累, 此模型与观测的矛盾也在增加^[80]。例如, 此模型认为周期长于 130ms 的高能脉冲星的外 Gap 应已熄灭, 因而不能产生 γ 射线辐射^[28]。这就不能解释 Geminga 的 γ 射线脉冲辐射。此外, 此模型对 Geminga 得到的 X 射线辐射流量也明显高于通过 Geminga 的表面温度导出的 X 射线流量值^[81]。针对这个问题, Chiang 等人 1995 年对外 Gap 模型作了改进^[82,57], 使之能解释 bridge 和硬度随相位的变化。Zhang 和 Cheng 为了解释 Geminga 等周期较长的年老 γ 射线脉冲星的高能辐射, 也对外 Gap 模型作了较大的修正^[83,84]。他们用厚度明显增大的外磁层真空 Gap 中的高能电子、各能段光子和强磁场相互作用的图像来解释 Geminga、PSR 1951+32、PSR 1055-52 和 PSR1746-44 等脉冲星的高能辐射, 与观测符合得比较好。

1998年, Mattox 等人报告了用 Geminga 前后 24yr 的 γ 射线观测数据进行时间分析 (timing) 的结果^[85]。他们更加精确地确定了 Geminga 的周期、周期变率、位置 ($6^{\text{h}}33^{\text{m}}54^{\text{s}}.153$, $+17^{\circ}46'12''.91$) 和自行, 甚至还得到了周期二阶变率。他们用守时方法得到的自行与光学测量结果一致。在 24yr 的数据中, 他们没有发现 Geminga 有 Glitch 现象, 却发现守时残差暗示了一颗行星的存在, 此行星的质量约为 $1.7 M_{\oplus}/\sin i$, 公转轨道半径为 3.3 天文单位, 周期为 5.1yr。这个结果还有待进一步确认。

4.2 X 射线辐射的观测

1992年, 自爱因斯坦天文台卫星探测到 Geminga 的 X 射线辐射以后, Halpern 和 Holt

用 ROSAT 卫星对 1E0630+178 在 0.07~2.4keV 能段作了 14390s 的长时间观测^[6]。在源附近 $1.5'$ 的范围内共得到 7630 个光子记录, 并以大于 99% 的置信度首次得到了 Geminga 的周期 0.237s。Geminga 的能谱似乎可以用一个单温度的黑体谱和一个幂律谱的叠加来拟合。Halpern 和 Ruderman 仔细分析了 Geminga 软 X 射线辐射的谱和脉冲轮廓, 并试图用中子星表面的热辐射来解释这些观测结果^[47]。他们的第一种模型包括两个黑体热辐射成份, 温度分别为 $T_1 \approx (5.2 \pm 1.0) \times 10^5 \text{K}$, $T_2 \approx 3 \times 10^6 \text{K}$, 对应于中子星整体表面和极冠加热区域, 两者面积比 $A_2/A_1 \approx 3 \times 10^{-5}$ 。两个成份都与脉冲星的旋转有关而呈脉冲形态, 但较硬的成份轮廓较窄, 其相位比较成份 (主脉冲) 超前约 105° 。另一种可能的模型用一个幂律谱加一个 (较低温度的) 热辐射谱来拟合观测结果。假设软 X 射线来自一个半径 10km 的中子星表面, 他们推算出 Geminga 的距离应为 150~400pc, 这与用星际柱密度数据拟合得到的结果吻合。Halpern 和 Wang 利用 ASCA, ROSAT 和 EUVE 的数据对 Geminga 在 0.1~10keV 能段的 X 射线辐射作了全面分析后认为这个源的大部分软 X 射线流量可以用一个温度为 $(5.6 \pm 0.6) \times 10^5 \text{K}$ 黑体辐射来拟合^[56]。硬 X 射线辐射的能谱是谱指数为 0.5 的幂律谱, 其脉冲轮廓中有一个较强的

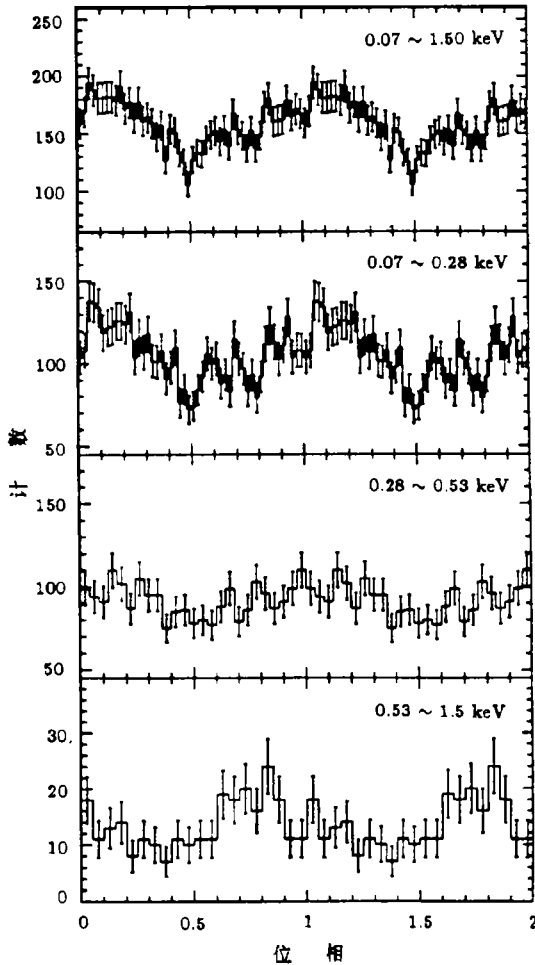


图 5 Geminga 的 X 射线辐射不同能段的脉冲轮廓^[47] 图中列出了两个周期。顶图是 ROSAT PSPC 的全部能段的总轮廓, 下面三个图是在三个连续的能段中的脉冲轮廓

的主峰和一个较弱的次峰。安装在 ROSAT 卫星上的位置灵敏计数器 PSPC 的三次观测表明 Geminga 的脉冲轮廓随时间有明显的变化。例如, 软 X 射线脉冲轮廓的精细结构 (通常用闭合

磁力线区的等离子体回旋共振散射引起的蚀来解释)在最近的大多数观测中就没有再出现。Geminga 的这些变化特性都可以与向磁层内区提供正负电子对 e^\pm 的非热过程联系起来。

1998 年, Wang 等人提出一个关于脉冲单星的 X 射线辐射的模型, 用来解释这种幂律成分加热辐射成分的谱特征^[86]。如果加速区位置较高, 与星体表面的距离为中子星半径的很多倍, 从加速区向中子星回流的带电粒子产生的一部分 100MeV 光子将在闭合磁力线区被转化为正负电子对, 因为在离中子星表面这么高的区域中, 磁力线切线将在到达中子星表面之前跨越开放磁力线区。这些电子对可能以两种方式对 X 射线辐射产生强烈影响: (1) 在磁场为 $B \approx 10^6\text{T}$ 的地方, 这些电子对产生之后马上通过同步辐射产生能量为 $0.1\text{keV} \leq E_x \leq 5\text{MeV}$ 的幂律 X 射线辐射, 谱指数约为 0.5。(2) 这些电子对最终将形成一个环绕整个中子星的回旋

辐射带, 只在开放磁力线区留出两个空洞。这个带的辐射正是上述黑体成分, 而空洞区的回流高能粒子妨碍了对炽热的极冠区的 X 射线辐射的观测。对非 γ 射线脉冲星来说, 由于不会产生光厚的回旋共振带, 两种温度的黑体辐射成分都能被观测到。

1998 年, Harding 和 Muslimov 提出关于 Geminga、Vela 和 PSR 0656+14 的 X 射线热辐射脉冲宽度的模型^[87], 对这些 γ 射线脉冲星的磁倾角和视线与转轴的夹角作出约束, 以导出与观测一致的 X 射线能量占总能量的份额以及脉冲宽度。他们的结论是: 上述两个角度都不会大于 30° , 同时 γ 射线的辐射束张角至多为 35° 。

5 结 语

Geminga 研究的历史充分地反映了观测仪器的进步对揭开自然之谜的重要性。在过去 20 多年中, 地面设备和空间仪器互相配合, 在对 Geminga 的观测研究中取得了丰硕的成果。人们相继发现了 Geminga 的 γ 射线辐射、X 射线辐射和光学辐射。而对 Geminga 本质的真正理解则始于在 X 射线波段对其脉冲信号的探测和周期的测定。由于

Geminga 是唯一已知的不表现为强射电源的 γ 射线脉冲星, 搞清它究竟是否也是射电脉冲星以及为什么它的射电辐射很弱, 对理解脉冲星的射电辐射和 γ 射电辐射之间的关系是至关重要的, 也有助于判定一些尚未认证的 EGRET 源究竟是所谓的射电宁静脉冲星还是活动星系核^[45]。尽管 Geminga 是否存在射电脉冲还是一个有争议的问题, 但目前观测技术的改进和理论水平的提高已经为这个问题的解决带来了希望。

致谢 张冰博士帮助查找了有关的最新资料, 并提出很多建设性的意见。徐仁新博士、刘继锋、王洪光等与作者进行了有益的讨论。赵永恒博士、施建荣博士、薛建桥博士等也在计算机

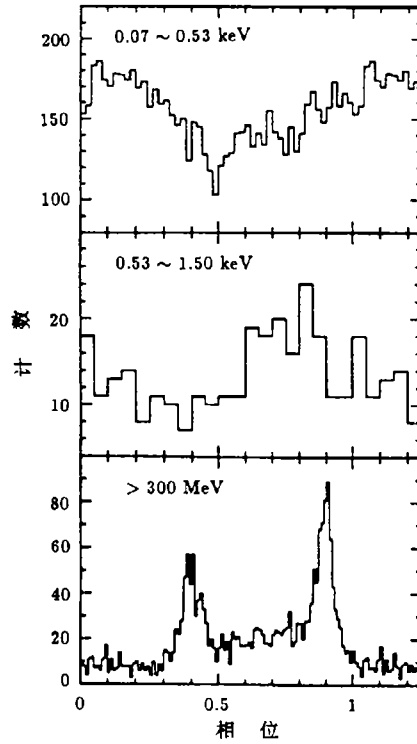


图 6 Geminga 的 X 射线脉冲轮廓和 γ 射线脉冲轮廓的比较^[47]
图中列出了一个半周期

资源方面提供了多方帮助。作者在此一并致以衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Fichtel C E, Hartman R C, Kniffen D A et al. *Ap. J.*, 1975, 198: 163
- 2 Bignami G F, Gavazzi C E, Harten R H. *Astron. Astrophys.*, 1977, 54: 951
- 3 Bignami G F, Caraveo P A, Lamb P C. *Ap. J.*, 1983, 272: L9
- 4 Bignami G F, Caraveo P A, Paul P A et al. *Ap. J.*, 1987, 319: 358
- 5 Bignami G F, Caraceo P A, Paul P A. *Astron. Astrophys.*, 1988, 202: L1
- 6 Halpern J P, Holt S S. *Nature*, 1992, 357: 222
- 7 Bertsch D L, Brasier K T S, Fichtel C E et al. *Nature*, 1992, 357: 306
- 8 Bignami G F, Caraveo P A. *Nature*, 1992, 357: 287
- 9 Vishwanath P R, Sathyanarayana G P et al. *Astron. Astrophys.*, 1993, 267: L5
- 10 Halpern J P, Martin C, Marshall H L. *Ap. J.*, 1996, 473: L37
- 11 马宇倩等. *天体物理学报*, 1992, 12: 390
- 12 武占成, 陆垓, 宋黎明. *天文学进展*, 1993, 11: 188
- 13 程凌翔, 李惕培. *天文学进展*, 1995, 13: 12
- 14 程凌翔, 孙学军, 李惕培. *天体物理学报*, 1995, 15: 289
- 15 Caraveo P A, Bignami G F, Mignani R et al. *Ap. J.*, 1996, 461: L91
- 16 张澍, 李惕培, 吴枚. *天文学报*, 1997, 38: 331
- 17 张澍, 李惕培等. *天体物理学报*, 1997, 17: 380
- 18 Usov V V, Melrose D B. *Ap. J.*, 1996, 464: 306
- 19 Zhao Y H, Lu T, Huang K L et al. *Astron. Astrophys.*, 1989, 223: 147
- 20 Lu T, Shi T Y. *Astron. Astrophys.*, 1990, 231: L7
- 21 Lu T, Wei D M, Song L M. *Astron. Astrophys.*, 1994, 290: 815
- 22 Wei D M, Song L M, Lu T. *Astron. Astrophys.*, 1997, 323: 98
- 23 宋黎明, 陆垓, 李惕培等. *天体物理学报*, 1998, 18: 191
- 24 王仲翔, 陆垓. *天体物理学报*, 1998, 18: 37
- 25 Zhang B, Qiao G J, Lin W P et al. *Ap. J.*, 1997, 478: 313
- 26 Zhang B, Qiao G J, Han J L. *Ap. J.*, 1997, 491: 892
- 27 Cheng K S, Ho C, Ruderman M. *Ap. J.*, 1986, 300: 500
- 28 Ruderman M, Cheng K S. *Ap. J.*, 1988, 335: 306
- 29 Cheng K S, Ho C, Ruderman M. *Ap. J.*, 1986, 300: 522
- 30 Taylor J H, Manchester R N, Lyne A G. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1993, 88: 529
- 31 Seiradakis J H. *Astron. Astrophys.*, 1981, 101: 158
- 32 Spelstra T A, Hermsen W. *Astron. Astrophys.*, 1984, 135: 135
- 33 Manchester R N, D'Amico N, Tuochoy I R. *M.N.R.A.S.*, 1985, 211: 975
- 34 Seiradakis J H. *IAU. Circ.*, 1992, 5532
- 35 Kuzmin A D, Losovskii B Y. *IAU Circ.*, 1997, 6559
- 36 Kuzmin A D, Losovskii B Y. *Astron. Lett.*, 1997, 23: 323
- 37 Malofeev V M, Malov O I. *Nature*, 1997, 389: 697
- 38 Shitov Y P, Pugachev V D. *New Astron.*, 1997, 113: 314
- 39 Shitov Y P, Pugachev V D. *New Astron.*, 1998, 3: 101
- 40 Shitov Y P, Malofeev V M. *IAU Circ.*, 1997, 6775
- 41 Vats H O, Deshpande M R, Shah C et al. *IAU Circ.*, 1997, 6699
- 42 Vats H O, Singal A K, Deshpande M R et al. *M.N.R.A.S.*, 1999, 302: L65
- 43 Ramachandran R, Deshpande A A, Indrani C. *Astron. Astrophys.*, 1998, 339: 787
- 44 Burderi L, Fauci F, Boriakoff V. *Ap. J.*, 1999, 512: L59
- 45 McLaughlin M A, Cordes J M, Hankins T H et al. *Ap. J.*, 1999, 512: 929
- 46 Kassim N E. *Ap. J.*, 2000, in press (astro-ph/9910420)

- 47 Halpern J P, Ruderman M. *Ap. J.*, 1993, 415: 286
- 48 Thompson D J. In: Johnston S, Walker M A, Bailes M eds. *Pulsars: Problems and Progress, Proc. of IAU Colloq. No.160*, Sydney, Australia, 1996, Sydney: ASP, 1996: 307
- 49 Zhang B, Hong B H, Qiao G J. *Ap. J.*, 1999, 514: L111
- 50 Malov I F. *Astron. Rep.*, 1998, 42: 246
- 51 Gil J A, Khechinashvili D G, Melikidze G I. *M.N.R.A.S.*, 1998, 298: 1207
- 52 Qiao G J. In: Börner G B ed. *High Energy Astrophysics*, Berlin: Springer Press, 1988: 88
- 53 Qiao G J. *Vistas Astron.*, 1988, 31: 393
- 54 Qiao G J. In: Hankins T H, Rankin J M, Gil J A eds. *The Magnetospheric Structure and Emission Mechanisms of Radio Pulsars, Proc. of IAU Colloq. No.128*, Zielona Gora, Poland: Pedagogical Univ. Press, 1992: 238
- 55 Qiao G J, Lin W P. *Astron. Astrophys.*, 1998, 333: 172
- 56 Halpern J P, Wang F Y H. *Ap. J.*, 1997, 477: 905
- 57 Romani R W, Yadigaroglu I A. *Ap. J.*, 1995, 438: 314
- 58 Caraveo P A, Bignami G F et al. *Ap. J.*, 1984, 276: L45
- 59 Sol H, Tarengi M et al., *Astron. Astrophys.*, 1985, 144: 109
- 60 Halpern J P, Grindlay J E, Tytler D. *Ap. J.*, 1985, 296: 190
- 61 Kulkarni S, Djorgovski S. *A.J.*, 1986, 91: 98
- 62 Djorgovski S, Kulkarni S. *A.J.*, 1986, 91: 90
- 63 Halpern J P, Tytler D. *Ap. J.*, 1988, 330: 201
- 64 Bignami G F, Caraveo P A, Mereghetti S. *Nature*, 1993, 361: 704
- 65 Bignami G F, Caraveo P A et al. *Ap. J.*, 1996, 456: L111
- 66 Mignani R P, Caraveo P A, Bignami G F. *Astron. Astrophys.*, 1998, 332: 37
- 67 Martin C, Halpern J P, Schiminovich D. *Ap. J.*, 1998, 494: L211
- 68 Shearer A, Golden A, Harfst S et al. *Astron. Astrophys.*, 1998, 335: L21
- 69 Bignami G F, Caraveo P A. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1996, 34: 331
- 70 Fierro J M et al. *Ap. J.*, 1998, 494: 734
- 71 Harding A K. *Ap. J.*, 1981, 245: 267
- 72 Daugherty R N, Harding A. *Ap. J.*, 1982, 252: 337
- 73 Dermer C D, Sturmer S J. *Ap. J.*, 1994, 420: L75
- 74 Sturmer S J, Dermer C D. *Ap. J.*, 1994, 420: L79
- 75 Sturmer S J, Dermer C D, Michel F C. *Ap. J.*, 1995, 445: 736
- 76 Daugherty J K, Harding A K. *Ap. J.*, 1994, 429: 325
- 77 Arons J. *Ap. J.*, 1981, 248: 1099
- 78 Ruderman M A, Sutherland P. *Ap. J.*, 1975, 196: 51
- 79 Harding A K, Ozernoy L M, Usov V V. *M.N.R.A.S.*, 1993, 265: 921
- 80 Romani R W. *Ap. J.*, 1996, 470: 469
- 81 Usov V V. *Ap. J.*, 1994, 427: 394
- 82 Chiang J, Romani R W. *Ap. J.*, 1994, 436: 754
- 83 Zhang L, Cheng K S. *Ap. J.*, 1997, 487: 370
- 84 Zhang L, Cheng K S. *M.N.R.A.S.*, 1998, 294: 177
- 85 Mattox J R, Halpern J P, Caraveo P A. *Ap. J.*, 1998, 493: 891
- 86 Wang F Y H, Ruderman M et al. *Ap. J.*, 1998, 498: 373
- 87 Harding A K, Muslimov A G. *Ap. J.*, 1998, 500: 862

Recent Progress in Geminga Research

Hong Bihai^{1,2,3} Han Jinlin^{1,3} Qiao Guojun^{2,3}

(1. National Astronomical Observatories, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

(2. Department of Astronomy, Peking University, Beijing 100871)

(3. The Chinese Academy of Sciences-Peking University Joint Beijing Astrophysics Center, Beijing 100871)

Abstract

We briefly introduced the history on Geminga research, and summarized recent progress on observational and theoretical efforts towards understanding this extraordinary object. The controversy on radio detection at low frequencies is reviewed in detail. At high energy bands, new results include the detection of Geminga's optical pulses, a much-detailed X-ray spectrum, the phase-resolved γ -ray spectrum, and the new timing solutions.

Key words pulsar astronomy: Geminga—radio radiation—high energy radiation—X-ray radiation