

PSR 0535-69——新发现的 SN1987A 亚毫秒光学脉冲星

陆 谈

(南京大学天文系)

提 要

本文对最近(1989年1月)在大麦哲伦云中著名超新星 SN1987A 内发现的一颗亚毫秒周期的光学脉冲星及其引起的研究热潮作了比较系统的评述。首先比较详细地给出了这颗脉冲星的基本观测事实和数据,然后分析了两类可能的理论模型——自转模型和振荡模型。也讨论了这颗脉冲星究竟是不是在这次超新星爆发时产生的问题。并且还讨论了这颗脉冲星对中子星物态所能给出的信息,以及它的 γ 射线光度的理论估计。

一、PSR0535-69 的发现

1987年2月23日, Shelton, Nelson 和 Jones 在大麦哲伦云中发现了一颗超新星爆发^[1],它被命名为 SN1987A。虽然每年都可以发现若干颗超新星爆发事例,但这样的近距离超新星爆发却是近四百年来的第一次。超新星爆发包含有十分丰富的物理过程,但只有近距离事例才能提供详细的数据资料。然而,四百年前的科学技术水平是十分低的。因此,人们对 SN1987A 的观测研究给以极高的热情。

SN1987A 的前身是一颗蓝超巨星 Sk-69 202(还有两个暗伴星), $m_V \sim 12.24$ 。爆发后一天, V 星等达到 4.5, 三个月后达到峰值, 成为一颗三等星。随后, 光度开始下降, 到 1989年1月17日, 已经降到 11.5 等^[2,3]。

实际上, 在光学上发现超新星爆发前几个小时, 日本的 Kamioka^[4] 和美国的 IMB^[5] 两个小组几乎同时记录到中微子暴。在 1987年2月23日7时35分(世界时), 前者在 13 秒钟内观测到 11 个中微子, 后者在 6 秒钟内观测到 8 个中微子。实际上, 宣称观测到中微子暴的还有苏联的 Baksan 小组以及较早 4 个多小时记录到中微子暴的意大利 Mt. Blanc 小组^[6], 不过这两个小组的数据不如前两个小组的可靠。中微子暴是在星体坍缩到中子星的过程中释放出来的。计算也表明, 坍缩到中子星所释放的引力能, 与中微子暴带走的能量相一致^[7]。一则表明中微子带走的确实是能量的主要部分, 二则表明确实形成了中子星。

从光谱观测分析也表明 SN1987A 是属于 II 型超新星的, 含氢量很高, 应当有中子星形成。

这些都有力地暗示 SN1987A 爆发时应当生成一颗脉冲星。日本 X 射线卫星“银河 (Ginga)”观测了 SN1987A 的低能(6—16keV)流量,似乎也暗示存在一颗脉冲星^[8]。

正因为种种迹象均表明 SN1987A 内应当有一颗脉冲星,人们就一直在试图寻找这颗星。终于在 1989 年 1 月 18 日,在 SN1987A 位置上,发现了一颗亚毫秒光学脉冲星。^[9,10]这颗脉冲星的基本观测事实为:

1. 这是一颗光学脉冲星,是用智利托洛洛山美洲天文台(Cerro Tololo Inter-American Observatory)的 4 米望远镜观测到的。观测时间为 1989 年 1 月 18.1 日(世界时)起的 7 个小时。这时, SN1987A 的年龄为

$$\tau = 695 \text{天} = 6.0 \times 10^7 \text{s} \quad (1)$$

其 V 星等为 11.5。

2. 光学脉冲的频率为

$$f = 1968.629 \text{Hz} \quad (2)$$

即周期为

$$P = 0.5079677 \text{ms} \quad (3)$$

3. 7 小时的观测数据分成 15 个组,除 3 个组不完全外,其他每组均为半小时,每个数据取样时间为 0.2ms。每组数据均独立进行分析。发现脉冲频率经地球自转和绕日运行的 Doppler 效应修正后存在着很好的正弦调制(见图 1)^[10]。图的上部为观测到的频率的原始数据,图的下部为经地球自转和绕日运行修正后的结果,显现出好的正弦调制。最小二乘法拟合给出:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{频率调制幅度 } \delta f = (1.5 \pm 0.3) \times 10^{-3} \text{Hz} \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{调制周期 } P_b = (8 \pm 1) \text{h} \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{周期变率 } \dot{P} < 3 \times 10^{-14} \text{s/s} \end{array} \right. \quad (6)$$

4. 光学脉冲的亮度在 7 小时的观测时间内就有明显变化,从 19 等上升到 18 等(见图 2^[10]),与超新星亮度相比,约相差 7 个星等。作为对照,蟹状星云和其脉冲星的亮度分别为 8.6 和 16.6,相差 8 个星等。除图 2 中所示的误差之外,还可能有 ± 0.5 等的系统误差。

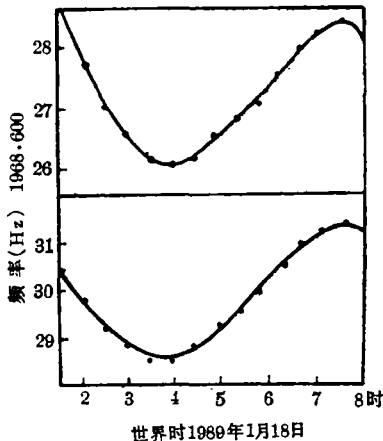


图 1 频率随时间变化

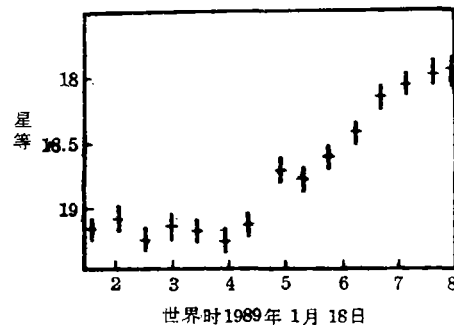


图 2 亮度(星等)随时间变化

5. 头三个谐频(f , $2f$, $3f$)处之幅度比约为 1:1.8:1.6, 可见谐波含量颇为丰富。不存在高于基频幅度 3% 的子谐频含量。作为参照, 蟹状星云脉冲星的头三个谐频处的幅度比为 1:1.8:1.1, 两者相近。

6. 12 天后(1989 年 1 月 31 日)用 2.5 米望远镜却没有观测到这颗脉冲星。2 月 14 日和 15 日欧洲南方天文台(ESO)用 3.6 米望远镜, 以每秒 10^4 次(取样时间 $\sim 0.1\text{ms}$)的测量速度, 也没有发现它^[11], 也就是说, 亮度当比 20 等更暗。以后还用不同望远镜作过多次观测, 也还没有发现它。

由于观测到的信号很强, 而且经反复检验不是仪器的差错, 应是来自 SN1987A 的真实信号。别的望远镜在别的时间没有观测到它, 通常被认为是信号被超新星膨胀气壳(包括尘埃)吸收的缘故。超新星爆发不过两年, 浓重气壳远未走散, 构成了近于阴天的“多云天气”。1 月 18 日的发现可能是碰巧遇上了云缝露光。事实上, 7 个小时的观测时间内亮度竟变化了一个星等($19^m \rightarrow 18^m$), 很可能就是这种多云天气的反映。

二、自转模型

所有已知的四百多颗脉冲星, 脉冲周期都是中子星自转的反映。所有单个脉冲星的周期都在变长, 就是说自转都在减慢。因此, 早期脉冲星的周期往往是很短的。人们自然地也把 0.5ms 看作是脉冲星的自转周期, 而其发现的那一天的年龄 $\tau = 695$ 天。

用简单磁偶极模型来估算脉冲星表面磁场, 应有

$$B_{12} \approx (P\dot{P}_{15})^{1/2} \quad (7)$$

其中 B_{12} 为以 10^{12}G 为单位的脉冲星表面磁场强度, \dot{P}_{15} 为以 10^{-15}s/s 为单位的周期变率 \dot{P} 。据(3)和(6)可知

$$B \lesssim 1.2 \times 10^{11}\text{G} \quad (8)$$

这是据 P 和 \dot{P} 的观测限算出的。可以认为, 这是观测给出的磁场上限的估值。

然而, 中子星磁偶极辐射功率为

$$W_d \approx \frac{32\pi^4 B^2 R^6}{3c^3 P^4} \approx 4 \times 10^{31} B_{12}^2 / P^4 \text{erg/s} \quad (9)$$

这里已取中子星半径 $R = 10^6\text{cm}$, 而其时(1989 年 1 月)光电测光观测表明, 整个 SN1987A 的 V 星等为 11.5, 相当于光度

$$L_{\text{SN1987A}} \approx 2 \times 10^{38} \text{erg/s} \quad (10)$$

我们知道, 蟹状星云自身已无能源, 其全部辐射的能量均来源于其脉冲星的磁偶极辐射。计算与观测的比较也证明, 蟹状星云的总光度基本上等于其脉冲星的磁偶极辐射功率。(10)式给出的只是光学光度。不过, 从 SN1987A 的 V 星等曲线来看(见图 3), 其从 HJD2446980 至 2447285 期间的曲线是一条直线, 其斜率正好与 Co^{58} 的蜕变一致。这表明, 光学光度主要从 Co^{58} 放出的 γ 射线经多次 Compton 散射热化而来。就是说, (10)式所示的光学光度基本上代表了 SN1987A 的总光度, 脉冲星提供的能量应当小于它, 即

$$W_d < L_{\text{SN1987A}} \quad (11)$$

由此, 可以确定这颗脉冲星表面磁场的上限

$$B < 6 \times 10^8 \text{G} \quad (12)$$

然而, 至今所知四百多颗脉冲星, 它们年轻时的磁场都高达 10^{12}G 量级。为什么这颗新生脉冲星的磁场竟会如此之弱? 这是难以理解的。有关自转模型的其它问题, 后面还要讨论。

三、振荡模型

为了使这颗新生脉冲星的磁场达到一定强度, 比如仍取

$$B \approx 10^{12}\text{G} \quad (13)$$

王青德等提出了一个新设想(简称 WCHRS 模型)^[12], 把 0.5ms 看作中子星的径向振荡周期, 而不是自转周期。这样, 只要其自转周期

$$P_S > 20\text{ms} \quad (14)$$

就不会有上述矛盾。

有趣的是, 对于典型中子星, 如 $M \sim 1M_\odot$ 和 $R \sim 10^6\text{cm}$, 其径向振荡周期(基波)

$$P \sim (G\rho)^{-1/2} \sim 0.4\text{ms} \quad (15)$$

正好与观测值符合得相当好。至于径向振荡的高阶模式和非径向振荡, 由引力、中微子和电磁的辐射引起的衰减时标往往很短, 约短于 1 年^[13-15], 应当衰减掉了。径向振荡基波模式的衰减时标视不同过程而异: 比如, 夸克物质的弱过程引起径向振荡衰减的时标可以短达毫秒级^[16-17]; π 凝聚态弱过程引起的衰减^[16,18], 时标长些, 但仍甚短, 由小时至天, 远短于 PSR0535-69 发现时的年龄, URCA 中微子发射过程引起的衰减, 时标可以长达 $\sim 10^2$ 年^[19]。由此可知, 振荡模型不仅可以解释 0.5ms 周期的大小, 而且只要此中子星内没有夸克物质和 π 凝聚态, 超新星爆发刚形成中子星时激发起来的径向振荡(基波)模式至今还可以完全没有衰减掉。

中子星的自转与径向振荡相耦合, 可以产生非径向振荡模式, 因而会引起引力辐射。这种引力辐射引起的振荡衰减时标为 $\sim 2 \times 10^3 P_S^4$ 年^[20], 这里 P_S 为以秒为单位的自转周期。为不使径向振荡通过这种方式被衰减掉, 就要求其自转周期

$$P_S \gtrsim 0.1\text{s} \quad (16)$$

当振荡传播至密度和声速陡然下降的星体表面薄层时, 会形成激波波前。在激波加速下, 粒子会达到很高能量。如果观测到的光学脉冲来自电子的同步加速辐射, 为使这种辐射在光波波段, 磁场必须很低。事实上

$$B \sin \alpha \sim 2.4 \times 10^7 \epsilon_{\text{eV}} E_{\text{MeV}}^2 \text{G} \quad (17)$$

式中 α 为电子运动与磁场的夹角, ϵ_{eV} 为以 eV 为单位的峰值光子能量, E_{MeV} 为以 MeV 为

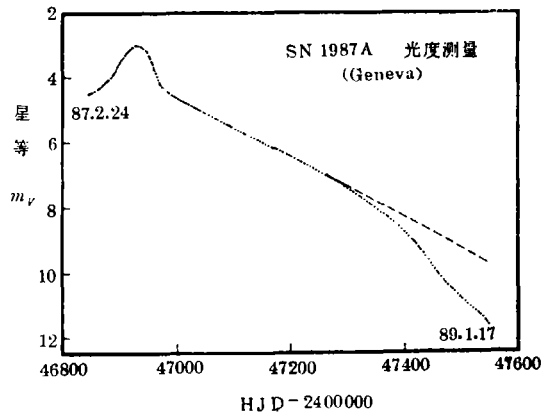


图 3 SN1987A 的 V 星等曲线

单位的电子能量。一般说来, 电子能量是十分高的。为使有足够的辐射落在光学波段, $\epsilon_{e\nu}$ 不能比光学光子能量高很多, 因而磁场必须十分弱。可见, 光学脉冲不可能来自电子的同步辐射。

有趣的是, 王青德等指出, 对于重离子, 如 Fe^{+20} , 由于仍处于非相对论情形, 其辐射主要是回旋辐射, 磁场与光子能量 ϵ 的关系为

$$B = Mc\epsilon/\hbar Q \\ \sim 0.3 \times 10^{12} (A/2Z)\epsilon_{e\nu} G \quad (18)$$

这时, 磁场就可以很强, 可以取 $\sim 10^{12} G$ 。式中 M 为重离子的原子质量单位, Q 为其电荷。因此, 在 WCHRS 模型中, 中子星的磁场在 $10^{12} G$ 量级, 而铁离子的回旋辐射正好可以提供产生光学脉冲的机制。

由于光学脉冲中含有丰富的谐波, 脉冲一定很窄。在 WCHRS 模型中, 这是通过假设发射区域很小(星体表面薄层)来实现的。由于头三个谐波幅度观测比值为 1:1.8:1.6, 与蟹状星云脉冲星的相应比值 1:1.8:1.1 接近, 表示其波形很可能具有类似的双峰结构^[10]。这一点可能在振荡模型中不易解释。

后来, Tsuruta 也在振荡模型的基础上提出了另一种设想^[21]。这种设想基于如下考虑: 超新星爆发时早期抛出的一些物质, 速度低于逃逸速度的还会再掉回来。假设这种下落吸积发生于 Eddington 极限附近, 吸积流内区处于双温相, 有均分磁场。这种磁化吸积流中会有电子回旋辐射。由于涉及的是电子, 这个模型仍然要求低磁场。

四、老中子星模型

迄今所知所有脉冲星的脉冲周期都是中子星自转的反映。对于 PSR0535-69, 把 0.5ms 视为它的自转周期的主要问题在于要求其磁场很弱, 而弱磁场的年轻脉冲星, 至今还未见到过先例。但是, 自然界确实存在着—类快速自转的弱磁场脉冲星, 这就是双星起源的毫秒脉冲星。这是一类老年脉冲星。要把 PSR0535-69 归入这一类, 除非放弃它形成于 SN1987A 爆发过程的观点而假设它在 SN1987A 爆发前早就存在。由于这一类可以自然地解释弱磁场, 我们认为这个假设是值得认真研究的。其实, 我们在 1989 年 3 月份就研究了这个问题^[22]。就是说, 我们假设 1987 年 2 月爆发的超新星 SN1987A 并不是形成了 PSR0535-69 这颗脉冲星, 而是形成了它的伴星。下面简略地讨论这个问题。

首先讨论这个假设是否与现有观测事实矛盾。比如, 既然它是一颗老年脉冲星, 为什么 SN1987A 爆发以前未观测到它? 这是因为以前没有取样时间短于 0.5ms 的测光技术, 脉冲星的存在只能提供一个 18—19 星等的平均亮度, 远暗于蓝超巨星(Sk-69 202, 12 星等), 难以观测到, 更无法证认为一颗脉冲星。又比如, 这颗脉冲星与蓝超巨星构成的系统可能是一个 X 射线源, 为什么爆发前人们未发现? 究其原因, 是因为这种系统一般吸积较弱, 且系较远的河外源, 其附近又存在着强 X 射线源(LMC X-1 和 PSR0540-693), 因而极难发现。

在这个模型中, 8 小时正弦频率调制自然可以解释为 PSR0535-69 与 SN1987A 爆发时形成的新生中子星之间的轨道运动的反映。由于 8 小时调制是很好的正弦调制, 双星轨道应

近于圆, 偏心率很小。取新生中子星质量 $M \sim 1M_{\odot}$, 按照 Kepler 定律, 可以求出轨道运动的线速度为 $3 \times 10^7 \text{cm/s}$, 它所引起的调频幅度为

$$\delta f \approx 2 \sin i \text{ Hz} \quad (19)$$

i 为轨道面倾角。与观测值 $\delta f_{ob} = 1.5 \times 10^{-3} \text{Hz}$ 比较, 可定出

$$i \sim 0.04 \quad (20)$$

可见, 这个轨道面近于垂直视线方向。

值得注意的是, 这个双星系统在超新星爆发前就是以 0.5ms 为周期自转着的中子星与蓝超巨星 Sk-69 202 组成的双星。一般地说, 这种双星运动会在蓝超巨星的分光观测中反映出来。但是, 要是超新星爆发没有使轨道面产生巨大变化, 这种小倾角特性就会使在蓝超巨星的分光观测中难以发现这种双星运动。

对于双星起源的脉冲星, 其自转周期是通过吸积加速达到的。吸积所能达到的最小周期由下式^[23]

$$P_{\min} = (1.9 \text{ms}) B_9^{6/17} (M/1.4M_{\odot})^{-5/17} (\dot{M}/\dot{M}_{\text{Edd}})^{-3/17} R_6^{15/17} \quad (21)$$

给出。取 $M = 1.4M_{\odot}$, $R = 10^6 \text{cm}$, 在 Eddington 吸积条件下, 要求 $P_{\min} \lesssim 0.5 \text{ms}$, 可估算出

$$B \lesssim 2 \times 10^8 \text{ G} \quad (22)$$

与(12)式一致。

另一方面, 观测到该脉冲星的光学亮度可达 18 等。自然, 脉冲星的光学光度不能大于其磁偶极辐射功率, 据此可估得

$$B \gtrsim 3 \times 10^7 \text{ G} \quad (23)$$

可见, PSR0535-69 这颗脉冲星的表面磁场应在如下很窄的范围内

$$3 \times 10^7 \text{G} \lesssim B \lesssim 2 \times 10^8 \text{G} \quad (24)$$

如果按磁偶极模型, 略去引力辐射, 可以定出相应的 \dot{P} 的范围

$$2 \times 10^{-21} \text{s/s} \lesssim \dot{P} \lesssim 8 \times 10^{-20} \text{s/s} \quad (25)$$

相应的特征时标 $P/2\dot{P}$ 的范围为

$$4 \times 10^9 \text{年} \gtrsim P/2\dot{P} \gtrsim 1 \times 10^8 \text{年} \quad (26)$$

五、转动条件对中子星物态的限制

在转动模型中, 由于转得太快, 这颗脉冲星已经不能再看作球形, 而应当考虑扁率效应。设转动是轴对称的, 引力辐射可以略去, 这时, 能量损耗只有磁偶极辐射, 能源来自中子星的转动能和形变引力势能(E_g) (假定不可压缩流体, 没有别的作用能), 能量平衡方程为

$$-\frac{dE}{dt} = -\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} I \Omega^2 + E_g \right) = \frac{2\mu^2}{3c^3} \Omega^4 \quad (27)$$

其中

$$\begin{cases} I = \frac{2}{5}MR^2(1-e^2)^{-1/2} \\ E_g = -\frac{3}{5}\frac{GM^2}{R}(1-e^2)^{1/2}\frac{\sin^{-1}e}{e} \end{cases} \quad (28)$$

e 为中子星扁率, R 为其原半径, μ 为中子星磁偶极矩相对于转动轴的垂直分量。可以用一个 Maclaurin 椭球^[24]来描述这个星体(假定密度 ρ 均匀), 此时

$$\begin{cases} \Omega^2/\pi G\rho = f(e) \\ f(e) = 2e^{-3}(3-2e^2)(1-e^2)^{1/2}\sin^{-1}e - 6e^{-2}(1-e^2) \end{cases} \quad (29)$$

注意

$$\{f(e)\}_{\max} = 0.45(0.37) \quad (30)$$

(括号内的数字是指计及 Maclaurin 椭球向 Jacobi 椭球转变的情形, 下同) 星体动力学稳定性要求

$$\Omega^2/\pi G\rho < 0.45(0.37) \quad (31)$$

利用(2)或(3)式数据, 可知

$$\rho > 1.6 \times 10^{15} (2.0 \times 10^{15}) \text{ gm/cm}^3 \quad (32)$$

这个条件给中子星物态以相当苛刻的限制。图 4 所示为各种物态下中子星的质量 M 与半径 R 的关系^[25]。图中 MF, TI, BJ, R 以及 π 和 π' 对应于不同类型的物态方程, 即分别表示平均场 (Mean Field)^[26], 张量作用 (Tensor-Interaction)^[27], Bethe-Johnson^[28], Reid^[29] 以及 π 凝聚态^[30]。对于 PSR0535-69, 0.5ms 线的左方才是允许的。可见, 几乎所有比较实际的物态都被排除了。

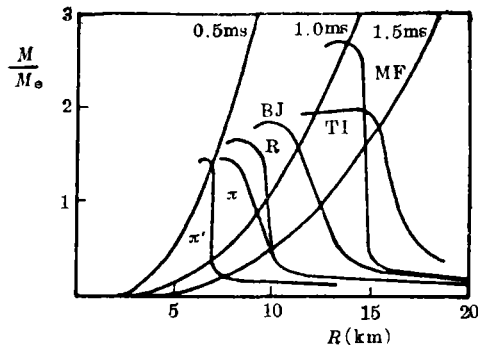


图 4 快速自转中子星的可能物态

应当注意, 取典型中子星半径 10^6cm 来作估计, 在 0.5ms 周期的转动条件下, 其赤道线速度将达 $1.2 \times 10^{10}\text{cm/s}$, 已近光速了。严格地说, 应当作相对论处理。上面的分析用的是非相对论, 因而只是粗略的近似。如果用广义相对论来进行处理, 结果也是相仿的。图 5

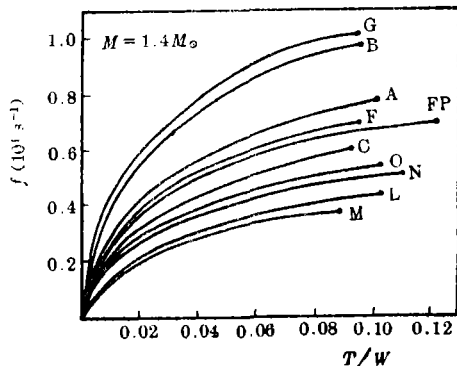


图 5 广义相对论中不同物态对自转速度的限制

绘出了广义相对论的计算结果^[31], 其纵坐标为中子星自转角速度 (相对于星体的静止的无穷远的观测者测得的角速度), 横坐标为转动动能 T 与引力势能 W 之比的相对论形式。图中所绘为 10 种物态所对应的曲线, 星体重子质量取为 $1.4M_{\odot}$ 。这 10 种物态的出处是 G^[32], B (Reid 核心, 带超子)^[29], A (Reid 软核)^[33], F^[34], FP (三核子作用)^[35], C (模型 I)^[28], O^[38], N (相对论平均场)^[37], L (平均场)^[26] 和 M (张量作用)^[27]。图中各条曲线的终端圆点代表星体赤道上圆轨道的

Kepler 频率 Ω_K , 这是任何均匀自转星体角速度的上限。注意, 对于 PSR 0535-69 而言, $\Omega = 1.2369261 \times 10^4 \text{s}^{-1}$ 。可见, 通常的物态都难以满足。如果 0.5ms 确代表这颗脉冲星的自转周期, 其物态恐怕是不一般的^[38]。事实上, 只有非常软的物态才会有高的中心压缩, 使得引力束缚足够强, 得以抗衡高速旋转引起的强离心力。

六、其 他

以下简略地讨论几个其他问题。

1. PSR0535-69, 作为新生中子星而磁场很弱, 是与已知其他年轻中子星均有强磁场的事实相矛盾的。然而, 已知其他中子星中, 年龄最轻的蟹状星云脉冲星, 也已近千岁。因此, 如果有一种机制能将新生中子星的弱磁场在 10^3 年内增强到 10^{12}G 量级, 这个矛盾也就不复存在。这种机制曾经提出来过, 但毕竟还纯属猜测^[39]。顺便指出, 文章[39]是关于这颗脉冲星的早期简要评述。

2. 鉴于 PSR0535-69 的磁场与周期的关系与通常的毫秒脉冲星很相似, Woosley 和 Chevalier^[40]提出了一个吸积加速模型。他们假设这颗中子星刚诞生时自转并不那么快, 也是通过吸积物质而加速才达到 0.5ms 这样短的周期的。只是吸积并非来源于伴星, 而是来源于超新星爆发后若干小时至一天内早先外抛而又落回的一部分物质。

3. 第四节中对观测到的脉冲的 8 小时频率调制作双星解释时, 由于脉冲星的伴星的质量取为 $\sim 1M_\odot$, 因而轨道面倾角必须十分微小。如果倾角并不很小, 一般都要求脉冲星的伴星质量十分小, $\sim 10^{-3}M_\odot$, 相当于一颗行星, 类似于木星^[41]。在 WCHRS 振荡模型中, 甚至把 8 小时频率调制视为定时噪声的结果^[12]。

4. PSR0535-69 是不是一颗 γ 射线脉冲星? 答案取决于其磁场有多强。直接从观测获得的磁场上限为 $1.2 \times 10^{11}\text{G}$ (见(8)式)。据 SN1987 A 光度给出的上限为 $6 \times 10^8\text{G}$ (见(12)式)。按双星吸积给出的上限为 $2 \times 10^8\text{G}$ (见(22)式)。脉冲星光度也给出了其下限为 $3 \times 10^7\text{G}$ (见(23)式)。这些都是在自转周期为 0.5ms 条件下的结果。在 WCHRS 模型中, 磁场取为 10^{12}G , 但自转周期应大于 20ms, 甚至大于 100ms。我们曾给出脉冲星成为 γ 射线脉冲星的判据^[42-44]。据此, 对这些情形计算了其 γ 射线光度 L_γ 和流量 F_γ ^[44] (见表 1)。表中 E_{ch} 为 γ 光子的特征能量。看来, 除非其磁场强达接近观测上限, 否则这颗脉冲星不太可能是一颗 γ 射线脉冲星, 因其 γ 射线流量还难以观测。

表 1 PSR0535-69 的 γ 射线辐射性质

P(ms)	B(Gauss)	E_{ch} (MeV)	L_γ (erg/s)	F_γ (光子/cm ² ·s)
0.508	1×10^{11}	0.40	1.2×10^{37}	7.8×10^{-5}
0.508	1×10^9	16.6	2.3×10^{35}	3.7×10^{-8}
0.508	2×10^8	6.62	6.0×10^{34}	2.4×10^{-8}
100	1×10^{12}	5.89×10^2	4.7×10^{33}	3.0×10^{-10}

参 考 文 献

[1] Kunkel, W. and Madore, B., IAU Circular No. 4316, (1987).

- [2] 李宗伟, 李浩江, 天文学进展, 6 (1988), 251.
- [3] Burki, G., Cramer, N., Burnet, M., Rufener, F., Pernier, B. and Richard, C., *The Messenger*, (1989), No. 55, 51.
- [4] Hirata, K., et al., *Phys. Rev. Lett.*, 58 (1987), 1490.
- [5] Bionta, R. M., et al., *Phys. Rev. Lett.*, 58 (1987), 1494.
- [6] Murdin, P., *Contemp. Phys.*, 28 (1987), 441.
- [7] Schramm, D. N., FERMLAB-Pub-87/91-A Preprint.
- [8] Dotani, T., et al., *Nature*, 330 (1987), 230.
- [9] Middleditch, J., et al., *IAU Circular*, No. 4735, (1989).
- [10] Kristian, J., et al., *Nature*, 338 (1989), 234.
- [11] *The Messenger*, (1989), No. 55, p. 52.
- [12] Wang, Q. (王青德), Chen, K., Hamilton, T. T., Ruderman, M. and Shaham, J., *Nature*, 338 (1989), 319.
- [13] Van Horn, H. M., *Astrophys. J.*, 236 (1980), 899.
- [14] Cameron, A. G. W., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 8 (1970), 200.
- [15] McDermott, P. N., Savedoff, M. P. and van Horn, H. M., *Astrophys. J.*, 281 (1984), 746.
- [16] Wang, Q. (王青德) and Lu, T. (陆 棣), *Phys. Lett.*, 148B (1984), 211.
- [17] 王青德, 陆 棣, 天体物理学报, 5 (1985), 59.
- [18] 王青德, 陆 棣, 物理学报, 34 (1985), 892.
- [19] Finzi, A. and Wolf, R. A., *Astrophys. J.*, 153 (1968), 835.
- [20] Chau, W. Y. (周威彦), *Astrophys. J.*, 147 (1967), 664.
- [21] Tsuruta, S., *Nature*, 339 (1989), 669.
- [22] 陆 棣, 赵永恒, 陆建隆, 科学通报, 35(1990).48.
- [23] Van den Heuvel, E. P. J., van Paradijs, J. A. and Taam, R. E., *Nature*, 322 (1986), 153.
- [24] Chandrasekhar, S., *Ellipsoidal Figures of Equilibrium*, Yale University Press, New Haven, (1969).
- [25] Harding, A. K., *Nature*, 303 (1983), 683.
- [26] Pandharipande, V. R. and Smith, R. A., *Phys. Lett.*, 59B (1975), 15.
- [27] Pandharipande, V. R. and Smith, R. A., *Nucl. Phys.*, A237 (1975), 507.
- [28] Bethe, H. A. and Johnson, M. B., *Nucl. Phys.*, A230 (1974), 1.
- [29] Pandharipande, V. R., *Nucl. Phys.*, A178 (1971), 123.
- [30] Maxwell, O. and Weiss, W., *Phys. Lett.*, 62B (1976), 159.
- [31] Friedman, J. L., Ipser, J. R. and Parker, L., *Astrophys. J.*, 304 (1986), 115.
- [32] Canuto, V. and Chitre, S. M., *Phys. Rev.*, D9 (1974), 1587.
- [33] Pandharipande, V. R., *Nucl. Phys.*, A174 (1971), 641.
- [34] Arponen, J., *Nucl. Phys.*, A191 (1972), 257.
- [35] Friedman, B. and Pandharipande, V. R., *Nucl. Phys.*, A361 (1981), 502.
- [36] Bowers, R. L., Gleeson, A. M. and Pedigo, R. D., *Phys. Rev.*, D12 (1975), 3043.
- [37] Serot, B. D., *Phys. Lett.*, 86B (1979), 146; 87B (1979), 403.
- [38] Haensel, P. and Zdunik, J. L., CAMK Preprint 200, (1989).
- [39] Alpar, M. A., Fushiki, I., Lamb, F. K., Miller, G. S., Park, M. -G. and Pines, D., *Nature*, 338 (1989), 295.
- [40] Woosley, S. E. and Chevalier, R. A., *Nature*, 338 (1989), 321.
- [41] Gaskell, C. M., *Nature*, 338 (1989), 121.
- [42] Lu, T. (陆 棣), in Proc. 5th M. Grossmann Meeting, Perth, Australia, (1988), to be published.
- [43] Zhao, Y. H. (赵永恒), Lu, T. (陆 棣), Huang, K. L. (黄克谅), Lu, J. L. (陆建隆) and Peng, Q. H. (彭秋和), *Astron. Astrophys.*, 223 (1989), 147.
- [44] Lu, T. (陆 棣) and Shi, T. Y. (史天一), *Astron. Astrophys.*, to be published.

(责任编辑 林一梅)

**PSR 0535-69—The Newly Discovered Submillisecond
Optical Pulsar in SN 1987 A**

Lu Tan

(Department of Astronomy, Nanjing University)

Abstract

In this paper, the present status of the researches on PSR 0535-69 are reviewed. First, the basic observational facts and data about this pulsar are given in detail. Then, two kinds of possible theoretical models, namely the rotating and the vibrating neutron star models, are analysed. And furthermore, some interesting problems related with the rotating neutron star model, such as the possibility of PSR 0535-69 being an old pulsar, the limitations on possible equations of state of this neutron star, and others, are also discussed.