

激变变星的长期演化

张 忠 勇

(中国科学院北京天文台, 北京 100080)

提 要

介绍激变变星长期演化的基本概念和标准模型, 及辐照效应对激变变星长期演化的影响。

关键词: 变星 — 激变变星 — 演化

分类号: P145.2

1 引 言

激变变星是一颗白矮星(主星)和一颗近主序小质量红矮星(伴星)构成的短周期双星。伴星充满其临界洛希瓣, 从内拉格朗日点向白矮星流失物质。本文的主题是激变变星的长期演化——时标在百万年以上的演化。这一领域的理论研究起始于70年代(Faulkner 1971), 在80年代取得了重大进展(Ritter 1986), 逐步建立了长期演化的标准模型。到90年代初Podsiadlowski (1991) 提出辐照效应对致密双星的长期演化可能有重大影响, 使该领域再度活跃。本文将介绍这一领域的基本概念和最新进展。在第二节我们简要描述对理解长期演化非常重要的观测特性, 在第三节我们介绍标准演化模型, 包括对观测特性的解释及尚存在的问题, 在第四节我们介绍辐照效应对长期演化的影响。

2 基本观测特性

长期演化导致的系统参数变化非常缓慢, 就单个系统而言在观测上无法测出。但是这种缓慢变化决定了观测到的处于各年龄阶段激变变星的集合特性, 如轨道周期分布和伴星质量流失率分布。

1. 轨道周期分布

轨道周期是激变变星中唯一可以精确测量的物理参数。迄今为止, 已测出100多颗激变变星的轨道周期 P_{orb} , 它们在轨道周期上的分布如图1。图中显示3个主要特征:

- (1) 大多数激变变星的轨道周期小于0.6天;
- (2) 存在一个约80分钟的最小轨道周期;

(3) 在 2 至 3 小时范围内明显缺少激变变星, 这一特征被称为周期空缺。

图 1 激变变星的轨道周期分布直方图

Fig. 1 Histogram of the orbital periods of cataclysmic variables (from Ritter 1986)

图 2 伴星质量流失率分布, 观测结果与理论结果的比较

Fig. 2 A diagram of the observed $\dot{M} - P_{orb}$ relation from Patterson (1984).

The dotted line represents the standard evolution from Kolb and Ritter (1992)

2. 伴星质量流失率分布

质量流失是发生在激变变星中最根本的物理过程。一方面, 充满洛希瓣的伴星从内拉格朗日点向白矮星流失物质, 这种物质流失在观测上表现为吸积盘、亮斑和闪烁; 另一方面, 白矮星通过新星爆炸把物质喷射到它的四周。矮新星和新星爆发都是伴星质量流失的结果。伴星质

量流失率可由间接证据如观测到的吸积盘光度得到。如图 2 给出了部分已知轨道周期的激变变星的伴星质量流失率 $\dot{M} = -\dot{M}_s$, 图中显示两个主要特征:

- (1) 伴星质量流失率范围在 $10^{-10.5} \sim 10^{-8.5} M_{\odot} / \text{a}$ 之间。轨道周期大于 3 小时的系统的伴星质量流失率明显比小于 2 小时的系统大一个量级以上。
- (2) 在相邻轨道周期上, 伴星质量流失率分布不连续, 或说弥散性较大。

3 标准演化模型

标准演化模型由四部分组成: 双星结构模型, 伴星质量流失模型及驱动机制, 主星长期演化近似和伴星结构与演化程序。我们在以下各小节中分别介绍。此外, 在第 5 小节我们根据标准模型解释激变变星的轨道周期分布特性, 并提出一些尚未解决的问题。

1. 激变变星结构模型

图 3 是一个无磁激变变星的结构模型示意图。在此模型中, 伴星充满其临界洛希瓣, 从内拉格朗日点向白矮星流失物质。由于流失的物质携带轨道角动量, 不能直接落到白矮星表面, 而是通过粘滞过程在白矮星周围形成一个吸积盘。此外, 连续流失的物质与已形成的吸积盘碰撞产生一个亮斑。对磁激变变星, 吸积盘被主星磁压部分或全部瓦解, 吸积流最终沿着磁力线落向白矮星两极。

图 3 无磁激变变星的结构模型示意图

Fig. 3 A sketch of the standard structure model of non-magnetic cataclysmic variables

洛希瓣的形状只依赖于双星质量比 q (定义 $q = M_{WD} / M_s$)。当 $q > 1.25$ 时, 伴星洛希瓣的体积半径 R_R 有一个简化的近似公式 (Paczynski 1971)

$$\frac{R_R}{a} = 0.462 \left(\frac{1}{1+q} \right)^{1/3} \quad (1)$$

其中 a 是双星间距。当伴星半径 $R_s \approx R_R$ 时, 我们说伴星充满洛希瓣。从(1)式和开普勒第三

定律可以导出充满洛希瓣的恒星平均密度与轨道周期的关系：

$$\bar{\rho} = \frac{3M_s}{4\pi R_s^3} \approx 115 P_{\text{orb}}^{-2} (\text{h}) \text{gcm}^{-3} \quad (2)$$

对近主序星取 $R_s/R_\odot \approx M_s/M_\odot$, (2) 式给出：

$$R_s/R_\odot \approx M_s/M_\odot \approx 0.11 P_{\text{orb}} (\text{h}) \quad (3)$$

因此在激变变星中, R_s 和 M_s 与 P_{orb} 有近似地线性关系。

2. 伴星质量流失模型及驱动机制

伴星充满其临界洛希瓣时, 内拉格朗日点处的气体能够从伴星大气层逃逸到主星洛希瓣中。伴星质量流失率取决于内拉格朗日点处发生的流体动力学过程。利用伯努尼原理可以把内拉格朗日点处的未知物理量表达为恒星光球层处的已知物理量的函数。由此 Ritter (1988) 导出了伴星质量流失率的一个近似公式：

$$-\dot{M}_s = \dot{M}_0 \exp\left(\frac{R_s - R_R}{H_p}\right) \quad (4)$$

其中 H_p 是大气层压力标高且 $H_p/R_s \approx 10^{-4}$, $\dot{M}_0 \approx 10^{-8} M_\odot / \text{a}$ 。

伴星质量流失的条件是伴星充满其临界洛希瓣。在完全守恒情况下, 即系统总质量和总角动量守恒, 质量较小的伴星向主星流失物质将导致两星间距增大从而终止质量流失过程。在大多数激变变星中, 虽然质量比 $q > 1$, 仍然观测到稳定的质量流失, 这意味着总质量守恒或总角动量守恒不成立。观测到的系统星风损失导致的总质量不守恒难以维持稳定的质量流失。因此, 如果质量流失不是自足的, 即由伴星的不稳定膨胀产生, 要维持小质量主序星稳定地充满其洛希瓣, 必须有某种机制损失系统轨道角动量。

有三种因素可能导致伴星不稳定性膨胀: 核演化, 热不稳定和动力学不稳定。伴星的核演化导致星半径在核时标上膨胀, 结果产生相应时标上的质量流失。但是, 小质量主序星的核时标非常长, 由核演化产生的质量流失率将比观测到的小得多。只有在含已演化或大质量伴星的系统中, 核演化才会产生可观测的质量流失率。而对大多数激变变星, 由核演化产生的质量流失不能解释观测结果。热不稳定产生的质量流失不可能发生在激变变星中。首先, 观测上已证认伴星是近主序星, 其次, 质量流失率比热不稳定产生的要低, 第三, 热不稳定性产生的高质量流失率将导致白矮星表面上的氢燃烧, 使之演化为红巨星。动力学不稳定产生的质量流失比热不稳定产生的更快, 也不可能发生在激变变星中。

既然伴星的质量流失不是自足的, 必然有外在机制通过损失系统轨道角动量驱动伴星质量流失。目前, 有两种机制可有效地损失系统轨道角动量: 引力辐射和磁阻尼。

引力辐射导致的角动量损失率可由爱因斯坦四极矩公式导出, 若近主序星充满其临界洛希瓣, 我们有

$$\left(\frac{\dot{J}}{J}\right)_{GR} = -1.27 \times 10^{-8} \text{a}^{-1} \frac{(M_{WD}/M_\odot)(M_s/R_\odot)}{[(M_{WD} + M_s)/M_\odot]^{1/3}} P_o^{-8/3} r b (\text{h}) \quad (5)$$

引力辐射驱动的伴星质量流失率可达 ($-\dot{M}_s \approx 5 \times 10^{-11} M_\odot / \text{a}$)。

星风磁阻尼最初解释了太阳较慢的自转周期。太阳磁场迫使星风在很大距离 ($100 R_\odot$) 内同步自转, 因此很小的质量损失率 ($\approx 2 \times 10^{-14} M_\odot / \text{a}$) 就可产生使自转变慢的力矩。在密近双星中, 类似的机制迫使伴星自转变慢。同时潮汐作用使伴星自转与公转同步, 于是磁阻尼也就导致了系统轨道角动量减小。虽然这种机制非常重要, 尚未有令人满意的理论给出定量结果。

将 G 型星中得到的磁阻尼规律应用于密近双星中, Verbunt 和 Zwaan (1981) 导出了轨道角动量损失率的一个半经验公式:

$$\left(\frac{\dot{M}}{J}\right)_{\text{vz}} = -3.0 \times 10^{-6} a^{-1} \frac{r_g^2}{f_{\text{vz}}^2} \frac{(1+q)^2}{q} \frac{(R_s/a)^4 (M_s/M_\odot)}{a/R_\odot} \quad (6)$$

其中 f_{vz} 是自由参数, r_g 是伴星的回旋半径。由(6)式计算, 磁阻尼驱动的伴星质量流失率可达 $-\dot{M}_s \approx 6 \times 10^{-10} (P_h/3)^{5/3} M_\odot/a$, 其中 P_h 是以小时为单位的轨道周期。

3. 主星长期演化近似

虽然少量物质可通过盘风从系统中逃逸出去, 伴星的流失物质大部分最终会被吸积到白矮星上。连续吸积富氢物质最终会导致白矮星表面氢燃烧。氢燃烧的方式依赖于白矮星的质量和吸积率 \dot{M} 。对高吸积率 $\dot{M} \geq 10^{-7} M_\odot/a$, 氢燃烧是稳定的; 对中等吸积率 $10^{-7} M_\odot/a \geq \dot{M} \geq 3 \times 10^{-9} M_\odot/a$, 氢燃烧是间隙性的; 而对激变变星中常见的低吸积率 $\dot{M} < 3 \times 10^{-9} M_\odot/a$, 白矮星表面积累的氢物质在燃烧前变为简并态, 处于简并态下的氢燃烧非常迅速, 导致白矮星表面热核爆炸, 即新星爆发。

目前的新星爆发理论认为新星是再发的, 即只要白矮星表面吸积积累的氢质量 $\Delta M_H = 10^{-4} \sim 10^{-6} M_\odot$ 就会发生一次新星爆发, 相应的再发时间 $\Delta M_H / \dot{M} \approx 10^4 \sim 10^6$ a, 短于长期演化时标。因此在研究系统的长期演化时, 可以把新星爆发引起的系统参数变化作平均化处理。目前的新星爆发理论很难严格给出爆发导致的系统总质量和总角动量变化。我们通常采用以下参数化方法处理这种不确定性,

$$dM_{\text{WD}} = -\eta dM, \quad (7)$$

$$dJ = \nu \frac{J}{M_{\text{tot}}} dM_{\text{tot}}, \quad M_{\text{tot}} = M_{\text{WD}} + M, \quad (8)$$

其中 η 描述物质从系统中逃逸出去的方式, 描述质量损失带走系统总角动量的方式。我们通常取 $\eta = 0$, $\nu = 1/q$, 即在每次新星爆发时损失所有积累的吸积物质, 损失的物质携带白矮星轨道运动角动量。

4. 伴星的长期演化及计算程序

目前的恒星理论认为小质量主序星由一个辐射核球和一个对流外壳构成。质量小于约 $0.3 M_\odot$ 的主序星处于完全对流状态。因此随着伴星质量流失, 对流壳与辐射核球的界面朝恒星内部延伸直到整个恒星变为完全对流状态。当伴星质量减小时, 伴星的热时标变长, 质量流失时标有可能小于热时标。事实上, 质量流失率可以大到足以迫使伴星稍微偏离热平衡, 从而使恒星半径比在热平衡时稍大。当伴星质量减小到 $0.095 M_\odot$ 时, 伴星内氢燃烧终止。伴星最终演化为一颗简并的黑矮星。激变变星长期演化的结局就是由一颗白矮星和一颗极小质量简并的富氢黑矮星构成的双星。

计算半相接双星演化等价于计算处于质量流失状态下的伴星演化。因此只要有合适的方法计算质量流失率, 任何恒星演化程序可以用于计算双星的演化。

对已知化学丰度的单星, 它的结构由5个参数确定: 质量、光度、表面温度、中心压强和中心温度。在热弛豫和核演化时, 质量是常数, 而其它4个参数和半径随时间变化。计算双星演化的最早方法要求恒星半径总是等于或小于洛希半径 (Kippenhahn & Weigert 1967)。在这种方法

中,质量流失率是由两个相邻恒星模型的质量差除以相应的时间步长计算。这种方法通常会导致质量流失率的跳变 (Kolb & Ritter 1990)。目前,我们用 Ritter (1988) 导出的公式(4)计算质量流失率。这种方法不改变恒星演化程序的结构,而且恒星半径不必严格等于洛希半径。伴星的质量通过积分(4)式得到。质量流失率由恒星半径和洛希半径之差的显函数给出。

在一个完备的恒星演化程序中,若应用(4)式计算质量流失,质量流失率的相对精度 $\Delta \dot{M} / \dot{M} = (R/H_p) \times (\Delta R/R) \approx 10^4 \Delta R/R$, 即要使质量流失率的相对精度达到1%, 恒星半径的相对精度必须达到 10^{-6} 。因此,要获得令人满意的质量流失率,在计算恒星模型时必须取很小的空间和时间步长。即使在很快的计算机上,应用(4)式计算一个完备的恒星演化过程也需要约 10^5 s CPU 时间,既费时又不方便。

为了研究各种参数对激变变星长期演化的影响,Kolb 和 Ritter (1992) 改进了计算小质量恒星演化的双多方球程序。在他们的广义双多方球程序中,伴星结构被处理为两个同心但指数不同的多方球,即辐射核球和对流壳,其中核球多方指数可随伴星质量变化。在稳定的质量流失情形,程序中质量流失率由 $R_s = R_R$ 和 $\dot{R}_s = \dot{R}_R$ 计算。在不稳定的质量流失情形,质量流失率可由(4)式计算。伴星的双多方球近似使得演化计算非常迅速,如果双多方球模型的自由参数预先得到校准,算出的结果与使用完备的恒星演化程序相差无几。

在数值计算中,我们一般取伴星初始状态为具有太阳丰度的零主序星,驱动机制为引力辐射(5)和磁阻尼(6),白矮星的质量为常数即所有吸积物质在新星爆发时被抛出了双星系统。图2中的点线就是用双多方球程序计算的一个激变变星演化结果。

5. 轨道周期分布的物理解释

激变变星中伴星质量流失是热稳定的,这一事实解释了轨道周期分布图中的长周期截止。一方面热稳定要求双星质量比 $q \geq 0.8$, 另一方面,白矮星质量不能超过钱德拉塞卡极限 $1.4M_\odot$, 于是伴星质量 $M_s \leq 1.75M_\odot$ 。若伴星是零主序星,激变变星最大轨道周期约为10小时。若伴星已演化到主序终止状态,最大轨道周期约为16小时。轨道周期大于16小时的系统,其伴星已经演化到了主序外或者处于热不稳定状态。在这两种情况下,系统寿命比普通激变变星短得多,被观测到的机会相应较低。

当伴星充满洛希瓣时,轨道周期 $P_{\text{orb}}^2 \propto R_s^2/M_s$, 即随着伴星质量流失 M_s 减小系统朝短周期演化,要求 R_s 同时减小。主序星的 R_s 与 M_s 成正比,因此含近主序星的激变变星朝短周期演化。但是,随着质量减小,伴星热时标最终会大于因引力辐射变强而逐渐变短的质量流失时标。当伴星质量减小到约 $0.1M_\odot$ 时 ($P_{\text{orb}} \approx 1.5\text{h}$), 伴星偏离热平衡, R_s 不再随着迅速减小,反而在 $P_{\text{orb}} < 1.5\text{h}$ 某处开始增加。这是因为当 $M_s < 0.095M_\odot$ 时,氢燃烧终止,伴星脱离主序最终演化为简并的黑矮星。简并的黑矮星半径 $R_s \propto M_s^{-1/3}$, 即随着质量流失简并星将膨胀,于是轨道周期增加。数值计算给出的最小轨道周期约为80分钟。

周期空缺是激变变星课题中最难解释的问题之一。Spruit 和 Ritter (1983) 提出的驱动机制突变较成功地解释了周期空缺。当轨道周期大于3小时,磁阻尼是最主要的驱动机制,相应的质量流失率较高。由于质量流失率较高,演化到 $M_s \geq 0.3M_\odot$ 处的伴星偏离热平衡,伴星半径稍大于平衡态时的半径。此时,持续的质量流失使伴星演化为完全对流星,辐射核球消失,伴星的磁活动迅速衰减,磁阻尼不再起作用。因此伴星不能在非热平衡态继续充满其洛希瓣,而是朝热平衡态演化,脱离洛希瓣直到伴星半径减小到平衡态半径。只有当引力辐射导致洛希半径

收缩到伴星平衡态半径时,系统再次成为半相接双星。由于观测上不能发现没有质量流失及吸积光度的分离系统,在轨道周期分布图中就出现了空缺。轨道周期大于3小时系统的质量流失率明显大于轨道周期小于2小时系统的质量流失率,这一事实似乎支持驱动机制突变假说。标准演化模型算出的伴星质量流失率是连续的(周期空缺处除外),而观测到的伴星质量流失率弥散性很大。目前还没有令人满意的理论解决这一矛盾。理论上存在两种可能性,一是外部驱动机制如磁阻尼随时间起伏变化,二是未知的物理机制如下节介绍的辐照效应迫使恒星半径起伏变化。

4 辐照效应对长期演化的影响

辐照效应指的是恒星受到外部辐照时发生的结构变化。当小质量恒星受到各向同性辐照时,若辐照光度大于恒星光度,恒星半径会有显著增加(Podsiadlowski 1991)。当小质量恒星约有一半受到辐照时(不完全辐照),恒星半径最大增加约10%(Zhang 1995)。在半相接双星中,伴星受到主星吸积光度辐照。辐照效应使得恒星半径成为辐照流量的函数,而辐照流量与伴星质量流失率成正比,质量流失率又是恒星半径的函数(方程4),于是形成一个正反馈循环。因此辐照效应对半相接双星长期演化可能有很大影响。

从几何位形上看(如图3),小质量恒星约有一半被辐照,若外部辐照能流不能穿透恒星光球层进入对流层,采用不完全辐照模型是合理的。对激变变星而言,吸积产生的辐射多在紫外波段。紫外光可以加热光球层,但不能穿透到对流层。因此我们应采用不完全辐照模型。在此模型中,恒星光度(单位时间恒星内部能量损失)修改为

$$L = 4\pi R_s^2 \{ (1-s)\sigma T_1^4 + s\sigma T_2^4 - sF_{irr} \} \quad (9)$$

其中 T_1 (T_2) 是未受(受)辐照面的有效温度, F_{irr} 是辐照流量, s (< 0.5) 是受辐照的面积与总面积之比。对受辐照的光球层作简化处理(RZK, 1995),可数值求解 $T_2(F_{irr})$ 。因此在恒星演化程序中应用修正的斯忒芬——波尔兹曼定律(方程9),就可以计算辐照效应对激变变星长期演化的影响。

由于辐照效应使恒星半径、伴星质量流失率、辐照流量形成正反馈循环,系统可能是不稳定的。包括辐照效应的动力学稳定性判据,由RZK(1995)导出为

$$\zeta_s - \zeta_R > \zeta_{irr} \equiv -M_s \frac{\partial}{\partial M_s} \left(\frac{\partial \ln R_s}{\partial t} \right)_{irr} \quad (10)$$

其中 ζ_s 是伴星的绝热质量半径指数, ζ_R 是洛希瓣的质量半径指数, ζ_{irr} 是由于辐照引起的恒星半径变化率。数值计算显示 $M_s \leq 0.6M_\odot$ 的系统的长期演化是稳定的。质量流失率与不考虑辐照效应的情形相差无几。而 $M_s > 0.6M_\odot$ 的系统的长期演化是不稳定的,质量流失率在恒星对流层热时标上发生振荡。图4显示伴星初始质量 $M_s = 0.8M_\odot$ 的系统在考虑辐照效应后的演化,显然伴星质量流失出现了振荡。

辐照效应导致的质量流失振荡可能解释 $M_s > 0.6M_\odot$ 的系统中质量流失率的弥散分布。但观测结果显示,质量流失率弥散在所有周期处都存在。理论上对此尚未有令人满意的解释。若放弃磁阻尼驱动机制,所有 $P_{orb} \geq 3h$ 的系统将是辐照不稳定的(Zhang 1995)。这样虽然能解释质量流失率分布的弥散性,但不能解释周期空缺。

图 4 引入辐照效应后一个激变变星的长期演化,模型参数如图中所示
 Fig. 4 Temporal evolution of $-\dot{M}_s$, R_s and ζ_{irr} in a cataclysmic variable with parameters as listed at the top of the figure

本项工作得到留学基金和台长基金支持,特致谢意。

参 考 文 献

- [1] Faulkner, J. 1971, ApJ Lett. 170, L99
- [2] Kippenhahn, R., Weigert, A. 1967, Z. Astrophys. 65, 251
- [3] Kolb, U., Ritter, H. 1990, AAp 236, 385
- [4] Kolb, U., Ritter, H. 1992, AAp 254, 213
- [5] Paczynski, B. Ann. Rev. AAp 9, 183
- [6] Patterson, J. 1984, ApJS 54, 443
- [7] Podsiadlowski, Ph. 1991, Nature 350, 136
- [8] Ritter, H. 1986, in: The Evolution of Galactic X-Ray Binaries, Truemper, J. et al. (eds.), 271
- [9] Ritter, H. 1988, AAp 202, 93
- [10] Ritter, H., Zhang, Z., Kolb, U. (RZK), 1995, in: Cataclysmic Variables, Bianchini, A. et al. (eds.), 479
- [11] Spruit, H.C., Ritter, H. 1983 AAp 124, 267
- [12] Verbint, F., Zwaan, C. 1981, AAp 100, L7
- [13] Zhang, Z. 1995, Phd Thesis

THE SECULAR EVOLUTION OF CATAclysmic VARIABLES

Zhang Zhongyong

(Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

The basic concepts and the standard evolution model of cataclysmic variables are introduced. The influence of irradiation on the secular evolution of cataclysmic variables is discussed.

Key words variable star — cataclysmic variable — evolution