

# 大质量双星系统的非守恒演化

黄 润 乾

(中国科学院云南天文台 昆明 650011)

## 摘 要

由于大质量双星系统有强大的星风物质损失,因而在研究其结构和演化时必须考虑星风物质损失、动量损失、物质交换以及由以上原因引起的轨道参量的变化。此外,天文观测又证实,一些大质量双星系统中存在星风冲击波,有 X 射线辐射以及有致密天体(白矮星,中子星)的存在,因此在研究大质量双星的演化时,又会遇到星风冲击波理论及其对演化的影响,双星系统何时会演化成为有公共外壳的系统,以及双星系统中如果发生超新星爆发,是否会将双星系统破坏等问题。近年来对上述问题的研究已有所进展。

**关键词** 恒星:大质量双星系统 — 恒星:超新星 — 恒星:星风

**分类号**: P153

70 年代后半期,天文观测发现许多单星和双星有强大的星风物质损失,这个发现严重冲击了以物质守恒为基础的恒星演化理论。建立质量不守恒的单星和双星演化理论就成为当前一个重要而艰巨的任务。大质量星有很多重要特性,例如有强大的星风物质损失,有很高的表面温度和很强的辐射压,可以演化成为超新星而爆发等。如果一颗大质量星同时又是双星系统的成员,则还要受到伴星的引力和辐射的作用以及系统转动的离心力作用。因此,大质量双星系统的非守恒演化将会遇到一系列很复杂的问题。

## 1 潮汐效应、自转效应对星风物质损失的影响

通过大量观测研究,已经得到许多关于单星星风物质损失速率的半经验公式<sup>[1~11]</sup>,这些公式说明,恒星的星风物质损失速率与其光度、半径和质量有密切关系。对于双星中的子星,通过观测直接得到星风物质损失速率的半经验公式是十分困难的。许多研究双星非守恒演化的工作<sup>[12~17]</sup>都假设,可以采用单星的半经验公式,计算双星子星的星风物质损失速率。Christopher 等人<sup>[18]</sup>根据 RS CVn 双星在发生洛希瓣物质交换前就能够出现质量反转现象推测,双星中的潮汐效应会加大子星的星风物质损失速率。并给出潮汐效应使 Reimers 星风公式<sup>[19]</sup>增大的因子。但是,这项工作没有研究潮汐效应可以使星风增大的物理机理,同时,Reimers 星风公式也不适用于温度很高的大质量恒星。Huang 和 Taam<sup>[20]</sup>对双星中子星的星风机制进行了研究。他们认为,子星表面最外层的粒子,吸收了由恒星内部传输的辐射能量

后, 可以克服恒星的引力作用而飞离恒星, 形成星风物质损失。显然, 当恒星表面的引力加速度减小时, 星风物质损失速率将增大<sup>[21]</sup>。在双星情况下, 两子星之间的引力作用(即潮汐效应)以及双星系统自转的离心力作用, 可以使子星表面的有效引力加速度减小。因而, 可以使星风物质损失速率增大。Huang 和 Taam<sup>[20]</sup>探讨了在有潮汐效应和系统自转效应情况下, 如何计算子星表面的有效引力加速度, 并给出了这些效应使星风物质损失速率增大的因子。同时, 他们还研究了一个  $40M_{\odot} + 25M_{\odot}$  的大质量双星系统的演化, 并发现, 潮汐效应、系统自转效应对子星星风物质损失速率的影响, 仅仅对于情况 A 演化(即物质交换过程发生在主星中心氢燃烧阶段的演化)是需要考虑的。

## 2 互相辐射效应对星风物质损失的影响

大质量星是早型热星, 根据 Castor 等人提出的辐射压驱动机理<sup>[22]</sup>, 以及观测给出的半经验公式<sup>[1~11]</sup>, 星风物质损失速率与恒星的光度有关。大质量双星中两颗子星互相辐射, 可以使子星的光度增大, 因而可以使子星的星风物质损失速率增大。Huang 和 Taam<sup>[20]</sup>给出因为互相辐射使主星的光度变化为:

$$\Delta L = f_1 \cdot l, \quad l = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{(A^2 - R_1^2)^{1/2}}{A} \right] L_2, \quad (1)$$

式中  $L_2$  为伴星的光度,  $R_1$  为子星的半径。A 为两子星之间的距离, 系数  $f_1$  表示伴星辐射给子星的能量, 只有一部分用以使子星的光度增大 ( $f_1 = 0.1 \sim 0.5$ )。知道了子星的光度增大, 就可以得到星风物质损失速率的增大。Huang 和 Taam<sup>[20]</sup>研究  $40M_{\odot} + 25M_{\odot}$  的大质量双星系统的演化发现, 互相辐射效应对子星星风物质损失速率的影响, 也仅仅对于情况 A 演化是需要考虑的。

## 3 物质损失与角动量损失的关系

以星风形式飞离恒星的物质, 同时携带走角动量, 造成角动量损失。而角动量损失又可以使两子星的轨道距离缩短, 使双星的周期变快。因此, 知道物质损失与角动量损失的关系, 计算出角动量损失, 是得到双星轨道参量变化的重要环节。然而, 由于不知道星风物质损失与角动量损失之间的关系, 许多作者为了进行双星非守恒演化计算, 通常需要引入一个参量来表达星风物质损失与角动量损失之间的关系。Vanbeveren 等人<sup>[16]</sup>给出物质损失  $\Delta M$  与角动量损失  $\Delta J$  之间的关系为:

$$\Delta J/J = 1 - \left( 1 - \frac{\Delta M}{M_1 + M_2} \right)^{\alpha} \quad (2)$$

Huang 和 Taam<sup>[20]</sup>根据星风物质是从恒星表面一个很薄的壳层内飞出的事实, 并假设双星是同步转动的, 理论上推导出星风带走的角动量损失为:

$$\Delta J = \left( \frac{2}{3} R_1^2 + X_{\omega}^2 \right) \Delta M_{1\omega} \omega + \left( \frac{2}{3} R_2^2 + (A - X_{\omega})^2 \right) \Delta M_{2\omega} \omega, \quad (3)$$

式中  $R_1$ ,  $R_2$  为两星的半径,  $X_\omega$  为公转轴至主星中心的距离,  $\Delta M_{1w}, \Delta M_{2w}$  为两子星的星风物质损失,  $\omega$  为双星系统的公转角速度。公式 (3) 的引入使得角动量损失计算不再需要参量。

## 4 轨道参量的变化

双星系统的轨道周期变化是由两子星的距离变化所决定的, 而两子星的距离变化是由两子星有物质损失、物质交换和角动量损失所引起。如何计算两子星的相对距离变化, 很重要的是如何计算双星系统的相对角动量变化。在很多双星理论工作中都假设, 两子星的自转角动量相对于轨道角动量很小, 可以忽略不计<sup>[23~26]</sup>。然而, 这个假设不合理, 因为子星在演化过程中体积可以膨胀很大, 使自转角动量变得很大。忽略自转角动量也就忽略了轨道角动量与自转角动量之间的转换<sup>[27]</sup>。Huang 和 Taam<sup>[20]</sup> 考虑了自转角动量以后, 给出了两子星因为有物质损失、角动量损失和物质交换而造成的两子星的相对距离变化为:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{1}{0.5-2\beta} \left[ \frac{\Delta J}{J} - \frac{\Delta M_1}{M_1}(1-\beta) - \frac{\Delta M_2}{M_2}(1-\beta) - \frac{\Delta M_1 + \Delta M_2}{M_1 + M_2}(\beta - \frac{1}{2}) - \frac{\Delta I_1 + \Delta I_2}{I_1 + I_2}\beta \right] \quad (4)$$

式中  $\Delta A$  为两子星间的距离变化,  $\Delta J$  为双星系统的角动量变化,  $\Delta M_1$ 、 $\Delta M_2$  为两子星的质量变化,  $\Delta I_1$ 、 $\Delta I_2$  为两子星的转动惯量变化, 系数  $\beta$  表示双星系统的自转角动量与总角动量之比。

## 5 发生物质交换过程的判据

物质交换过程是双星中最重要的一个物理过程。物质交换过程何时发生, 以及物质交换过程的长短, 都会对双星的演化性质和演化结果产生重要影响。长期以来许多双星演化工作都是以子星的半径等于临界洛希瓣半径作为是否发生物质交换过程的判据<sup>[20,23~26,28,29]</sup>, 并且从未有人研究发生物质交换过程的判据对于双星演化是否有严重影响。然而, Huang<sup>[30]</sup> 指出, 以子星的半径等于临界洛希瓣半径作为是否发生物质交换过程的判据, 在理论上是不严格的, 因为在计算临界洛希瓣半径时, 考虑了两子星的引力以及系统转动时离心力的影响, 但是在计算子星的半径时却忽略了伴星的引力和系统转动时离心力的影响。Huang<sup>[30]</sup> 给出了双星中发生物质交换过程的严格判据, 并证明发生物质交换过程的判据对于双星演化有严重影响。

## 6 辐射压对洛希瓣的影响及对双星物质交换的影响

大质量双星中的子星是温度很高、辐射压很大的恒星。辐射压的作用可以使洛希瓣的形状产生变化, 例如可以使洛希瓣的右边张开。在这种情况下, 如果一颗子星充满洛希瓣而发生物质交换, 物质可能由张开的洛希瓣流出双星系统。因此, 很多人认为<sup>[31~36]</sup>, 对于大质

量双星, 辐射对洛希瓣和物质交换的影响很重要, 使物质交换变得十分复杂, 因而使大质量双星的演化研究也变得十分困难。然而 Huang 和 Taam<sup>[20]</sup> 指出, 辐射的作用和引力的作用不同, 如果辐射在传输过程中被物质吸收, 则辐射压对洛希瓣的影响也随着取消。Huang 和 Taam 研究了当主星充满洛希瓣, 并通过内拉格朗日点流出物质时, 在洛希瓣内的物质密度可以使光学深度  $\tau \approx 100$ , 因此, 在洛希瓣内来自两子星的辐射都被吸收掉, 它们对洛希瓣的影响以及对物质交换的影响也就不存在。

## 7 通过卷入过程 (Spiral-in) 形成有致密天体的双星系统

天文观测发现, 一些大质量双星系统中有致密天体 (白矮星, 中子星) 的存在, 并且存在致密天体的双星系统, 通常都周期很短。这样的双星系统用正常的双星演化理论 (有物质交换和物质损失) 是不可能得到的。于是人们提出了通过卷入过程 (Spiral-in), 可以使一颗子星卷入到另一颗子星的外壳之内, 再通过将外壳丢失以后, 便形成一个有致密天体的双星系统。有三种可能的原因使双星系统产生 Spiral-in 过程:

(1) Darwin<sup>[37]</sup>、Counselman<sup>[38]</sup> 指出, 如果双星系统的轨道角动量  $J_{\text{orb}}$  与主星的转动角动量  $J_{\text{rot}}$  满足以下关系:

$$J_{\text{orb}} \leq 3J_{\text{rot}} \quad (5)$$

则次星将卷入到主星的外壳之内。对于条件 (5) 的存在, 可作如下说明: 如果子星因某种原因而自转减慢, 则因潮汐效应, 将有一部分轨道角动量转移给子星, 迫使子星恢复原来的自转速度。由于轨道角动量减小了一部分, 于是两星的距离减小, 公转速度加快。因为公转速度大于子星的自转速度, 潮汐效应又使一部分轨道角动量转移给子星, 使子星的自转速度加快。由于轨道角动量减小了一部分, 于是两星的公转速度又加快。如此不断下去, 两星的距离不断靠近, 最后使一颗子星卷入到另一颗子星的外壳之内。但是, 如果双星系统的轨道角动量很大, 潮汐效应使轨道角动量的减小, 仅仅引起轨道角动量的微小变化, 上述不断加快转动的过程会停止, 并使子星的自转与公转在某速度下达到稳定的同步。因此, 当系统的轨道角动量小于某一定值, 即满足条件 (5) 时, 则会产生 Spiral-in 过程。

(2) 如果两子星的质量比  $q = M_2/M_1$  过小, 例如  $M_1 > 2.5M_2$ , 则主星外壳的热时标远小于次星外壳的热时标。在两子星发生物质交换时, 主星丢失物质和次星吸积物质都是以外壳的热时标进行的。于是会出现次星接收了大量物质但来不及进行热调节, 次星会迅速膨胀, 并充满洛希瓣, 形成有公共外壳的双星系统。

(3) 在两子星物质发生交换时, 如果主星的外壳是对流的, 并以动力学时标损失物质, 同样会使次星接收大量物质但来不及进行热调节, 次星会迅速膨胀, 并充满洛希瓣, 形成有公共外壳的双星系统。

## 8 经过 Spiral-in 过程并丢失外壳后轨道周期的变化

轨道周期的变化可以由两子星的轨道距离变化得到, 后者又可以根据公共外壳物质丢失

前后系统总能量的变化而得到<sup>[39,40]</sup>:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\alpha_{ce} M_{1c} M_2}{(M_{1c} + M_{1e})} \bigg/ \left( \alpha_{ce} M_2 + \frac{2M_{1e}}{\lambda R_{cr1}} \right) \quad (6)$$

式中  $A_2$ ,  $A_1$  为公共外壳物质丢失前后和没有发生 Spiral-in 过程前两子星间的距离, 系数  $\alpha_{ce}$  表示系统减少的总能量中, 有多少部分用于将外壳物质抛射.  $M_{1c}$  和  $M_{1e}$  是在发生 Spiral-in 过程前主星的核和外壳的质量,  $R_{cr1}$  是洛希瓣的半径.  $\lambda$  是权重因子, 由外壳密度决定,  $M_2$  为伴星的质量. 以上在研究两星距离的变化时, 仅仅考虑了在公共外壳物质丢失前后系统总能量的变化, 而没有考虑在外壳物质损失前后的角动量损失, 因此由 (6) 式给出的两星距离的变化还不是十分精确的.

## 9 通过超新星爆发而不破坏双星系统的条件

一些大质量双星系统中有中子星存在, 并伴有 X 射线辐射. 通常认为中子星是超新星爆发后遗留下来的. 因此需要研究超新星爆发而不破坏双星系统的条件. 假设主星  $M_1$  发生超新星爆发, 并遗留一颗其质量为  $M_n$  的中子星, 并且假设伴星  $M_2$  在超新星爆发前后的速度  $v$  不变, 以及两星间的距离  $A$  不变. 则爆发后的总能量为:

$$E'_{tot} = \frac{1}{2} \frac{M_n M_2}{M_n + M_2} v^2 - \frac{GM_n M_2}{A} = \frac{GM_n M_2}{2A} \left( \frac{M_1 + M_2}{M_n + M_2} - 2 \right) \quad (7)$$

超新星爆发后仍维持双星系统的条件是系统的总能量为负值, 即  $E'_{tot} < 0$ , 可得到:

$$M_s < (M_1 + M_2)/2 \quad (8)$$

这里  $M_s$  为超新星爆发抛射的外壳物质质量, 它小于系统总质量的一半, 则双星系统不会因为超新星爆发而破坏.

## 10 大质量双星系统中的碰撞星风冲激波

大量观测事实证明, 在大质量双星系统中存在碰撞星风冲激波, 并且在激波面上产生 X 射线辐射. 此外, 星风冲激波的存在对于双星中的物质交换有严重影响, 因而对双星的演化有重要影响. 因此在研究大质量双星的演化时, 需要星风冲击波理论, 并研究星风冲击波对双星演化的影响.

(1) 激波动力学理论:

Huang 和 Weigert<sup>[41]</sup> 根据两束超音速星风气流相碰撞时任何气流都不能穿过激波面而和激波面稳定存在的事实, 首先提出了采用动量守恒和质量守恒方程进行描述激波的动力学理论. 假设激波面极薄, 对于激波面上任意点  $P$  处, 其切向和法向的动量守恒方程为:

$$J_1 \sin^2 \alpha_1 - J_2 \sin^2 \alpha_2 = \frac{\rho F}{R} \quad (9)$$

$$J_1 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 + J_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 = \frac{d(\rho_F v^2)}{ds} \quad (10)$$

式中,  $J_i = \dot{m}_i v_i / 4\pi r_i^2$  ( $i = 1, 2$ ) 为来自星风的动量流,  $\dot{m}_i, v_i$  分别为两子星的星风物质损失速率和星风的速度,  $r_i$  为两子星至  $P$  点的距离,  $R = |(1 + y'^2)^{3/2} / y''|$  为激波面的曲率半径,  $\rho_F$  为激波面上的质量密度,  $v$  为物质在激波面上的流动速度,  $\alpha_i$  为星风动量流与激波面  $P$  点的切线的交角。

解方程 (9)、(10) 则可得激波的形状和位置。以后又发展了激波面厚的、三维的、非对称结构的激波理论<sup>[42,43]</sup>, 但采用的基本方程仍是动量守恒方程和质量守恒方程。

(2) 激波对双星演化的影响:

黄润乾指出<sup>[44]</sup>, 星风激波的存在可以阻止两星间的物质交换, 从而增大了系统的物质损失和角动量损失。当星风激波阻止了两星间的物质交换时, 系统的角动量损失为:

$$\Delta J = \left( \frac{2}{3} R_1^2 + X_\omega^2 \right) (\Delta M_{1w} + \Delta M_{1c}) \omega + \left( \frac{2}{3} R_2^2 + (A - X_\omega)^2 \right) \Delta M_{2w} \omega, \quad (11)$$

式中  $R_1, R_2$  为两星的半径,  $X_\omega$  为公转轴至主星中心的距离,  $\Delta M_{1w}, \Delta M_{2w}$  为两子星的星风物质损失,  $\omega$  为双星系统的公转角速度,  $A$  为两子星之间的距离,  $\Delta M_{1c}$  表示由主星通过内拉格朗日点流出的物质, 由于激波的作用, 使这部分物质沿着激波面流出双星系统, 并带走角动量。文献 [44] 计算了  $40M_\odot + 30M_\odot$  的大质量双星系统的演化, 并指出当考虑星风激波作用时, 系统的周期将大大变短, 总质量将大大减小。

### 参 考 文 献

- 1 Barlow M J. *Cohen M. Ap. J.*, 1977, 213: 737
- 2 Abbott D C, Biegging J H, Churchwell E B. *Ap. J.*, 1981, 250: 645
- 3 De Loore C. *Phys. Scr.*, 1984, T7: 25
- 4 Garmany C D, Olson G L, Conti P S et al. *Ap. J.*, 1981, 250: 660
- 5 Garmany C D, Conti P S. *Ap. J.*, 1985, 284: 705
- 6 Chiosi C. *Astron. Astrophys.*, 1981, 93: 163
- 7 Lamers H J G L M. *Ap. J.*, 1981, 245: 593
- 8 Nieuwenhuijzen H, de Jager C. *Astron. Astrophys.*, 1990, 231: 134
- 9 Wilson I R G, Dopita M A. *Astron. Astrophys.*, 1985, 149: 295
- 10 Waldron W L. In: Underhill A B, Michalitsianos A G eds. *The Origin of Non-Radiative Heating/Momentum in Hot Stars*, Washington: NASA, 1984: 2358
- 11 De Jager C, Nieuwenhuijzen H, van der Hucht K A. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1988, 72: 259
- 12 Refsdal S, Weigert A. *Astron. Astrophys.*, 1971, 13: 367
- 13 Van der Heuvel E P J, de Loore C. *Astron. Astrophys.*, 1973, 25: 387
- 14 Sugimoto D. *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 1976, 28: 593
- 15 Ziolkowski J. In: Couti P S, de Loore C W H eds. *Mass Loss and Evolution of O-Type Stars*, IAU Symp. 83, Vancouver Island, Canada, 1978, Dordrecht: Reidel, 1979: 385
- 16 Van Beveren D, de Greve J P, Van Dessel E L et al. *Astron. Astrophys.*, 1979, 73: 19
- 17 Giannuzzi M A. *Astron. Astrophys.*, 1981, 103: 111
- 18 Christopher A T, Eggleton P P. *M.N.R.A.S.*, 1988, 231: 823
- 19 Reimers D. *Mem. Soc. R. Sci. Liege*, 1975, 6e Ser. 8: 369
- 20 Huang R Q, Taam R E. *Astron. Astrophys.*, 1990, 230: 107
- 21 Friend D B, Castor J I. *Ap. J.*, 1982, 261: 293
- 22 Castor J I, Abbott D C, Klein R I. *Ap. J.*, 1975, 195: 157
- 23 Paczynski B. *Acta Astron.*, 1967, 17: 193
- 24 Paczynski B. *Acta Astron.*, 1967, 17: 355

- 25 Kippenhahn R, Weigert A. *Zeitschr. Astrophys.*, 1967, 65: 251  
 26 De Loore C. *Space Sci. Rev.*, 1980, 26: 113  
 27 Huang R Q, Yu K N, Han Z W. *Astron. Astrophys.*, 1992, 256: 438  
 28 Vanbeveren D. *Space Sci. Rev.*, 1991, 56: 249  
 29 De Greve J P. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1993, 224: 95  
 30 Iiuang R Q. *Astron. Astrophys.*, 1999, in press  
 31 Schuerman D W. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1972, 19: 351  
 32 Kondo Y. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1974, 27: 293  
 33 Kondo Y, McCluskey G E. In: Eggleton P, Mitton S, Whelan J eds. *Structure and Evolution of Close Binary Systems*, IAU Symp. 73, Cambridge, 1975, Dordrecht: Reidel, 1976, 277  
 34 Vanbeveren D. *Astron. Astrophys.*, 1976, 54: 877  
 35 Vanbeveren D. *Astron. Astrophys.*, 1977, 62: 59  
 36 Vanbeveren D. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1978, 57: 41  
 37 Darwin C H., *Scientific Papers*, Vol. 2, Cambridge Univ. Press, 1908  
 38 Counselman C C. *Ap. J.*, 1973, 179: 181; 180: 307  
 39 Livio M, Soker N. *Ap. J.*, 1988, 329: 764  
 40 Van den Heuvel E P J. In: Nussbaumer H, Orr A eds. *Interacting Binaries*, Berlin: Springer-Verlag, 1992, 392  
 41 Huang R Q, Weigert A. *Astron. Astrophys.*, 1982, 112: 281  
 42 Bandiera R. *Astron. Astrophys.*, 1993, 276: 648  
 43 Kallrath J. *M.N.R.A.S.*, 1991, 248: 653  
 44 黄润乾. *天体物理学报*, 1997, 17(2): 157

## Non-conservative Evolution of Massive Binary Systems

Huang Runqian

(Yunnan Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

### Abstract

It is known that massive stars have a lot of special features, e.g., they have strong stellar winds and thus great mass loss, high surface temperature and strong radiation pressure, and will evolve into a supernova explosion. If a massive star is at the same time a component of a binary system, it will also be subjected to the effects of the gravitational and the radiational field of its companion star. Thus, the development of the theory of non-conservative evolution of massive binaries will encounter a series of very sophisticated problems such as:

Since the rate of mass loss due to stellar wind of a massive star is related to the gravitational acceleration on the surface and the luminosity of the star, thus we have to know the effects of tide, rotation and irradiation on the rate of mass loss.

The matter escaping from the surface of a star in the form of stellar wind will take away angular momentum at the same time. Thus, we have to know the relationship between the mass loss and the angular momentum loss.

We need to know how the orbital period of the binary system changes when both stars have mass loss and angular momentum loss and at the same time mass transfer occurs.

It is interesting to know, in the case that the stars have very high surface temperature and

very strong radiation pressure, how their radiation affects the Roche lobe and the mass transfer.

Under certain condition, the two stars can evolve to a system with a common envelope. After the loss of the common envelope, the binary system becomes one with a very short period. It is important to determine the criteria for the two stars to evolve to have a common envelope, and the change in the orbital period of the binary system after the loss of the common envelope.

If a component evolves to a supernova, the explosion being another way for significant loss of mass and angular momentum, the questions arise whether the explosion will destroy the binary system and what the criteria are for this to occur.

When both stars have stellar wind, the collision of stellar winds will produce a shock front. The hydrodynamic theory of the shock front and the effects of the shock front should be known.

All the above problems have been discussed in the present paper.

**Key words** stars: massive binary system—stars: supernovae: general—stars: stellar wind