

环绕双星盘：一种高效提取轨道角动量的机制

陈文聪¹, 曾庆国²

¹ 商丘师范学院物理与信息工程系, 商丘 476000;

² 南京大学天文系, 南京 210093

E-mail: chenwc@nju.edu.cn

2008-04-07 收稿, 2008-06-23 接受

国家自然科学基金(批准号: 10573009, 10573010)和河南省高校科技创新人才支持计划资助项目

摘要 密近双星演化过程中, 系统轨道角动量的损失对质量传输及轨道演化有重要的影响. 传统的轨道角动量损失机制有引力波辐射、质量损失和磁制动三种. 然而, 双星在物质交流期间, 少量的质量外流可能形成一个与系统轨道共面的、薄且开普勒转动的环绕双星盘(CB盘). CB盘同双星间的引力相互作用产生的潮汐矩将有效地制动系统, 从双星的轨道运动中提取轨道角动量, 即使盘内边缘的质量输入率非常小时, CB盘也是一种极有效的轨道角动量损失机制. 对白矮星双星演化的数值计算表明, CB盘的存在可以提高质量传输率, 导致双星轨道持续收缩. 最后, 简要介绍了近年来关于CB盘的理论研究和观测进展.

关键词
轨道角动量
质量损失
磁制动
CB盘

密近双星是恒星世界中一种普遍存在的天体, 可以提供可靠的物理参数和重要的恒星演化线索. 双星中的相互作用为研究恒星大气结构、星周物质分布、星风和吸积过程、质量交流等提供了良好的机会.

观测上, 大约50%左右的恒星位于双星系统中. 如果双星系统中两颗子星距离很远, 彼此之间相互作用可以忽略, 则它们的演化过程与单星类似. 大约有30%的双星系统中主星在演化过程中会充满其临界洛希面, 受伴星引力场的影响, 物质将通过内拉格朗日点流向伴星, 即两子星之间发生物质交流现象. 以上这一过程使得双星的演化性质与单星明显不同, 这类双星系统称为密近双星. 观测中的许多特殊现象, 如a型超新星、新星、X射线源等高能天体都是含有致密天体的密近双星. 对密近双星演化的研究, 已经成为现代天体物理学中的重要领域之一. 我国学者在双星的视向速度和光变曲线等领域做了一些有意义的工作^[1,2].

英国剑桥大学的Eggleton教授发展了一个恒星演化程序^[3,4], 现为广大研究双星演化的科研工作者所使用. 该程序包既可以计算一个单星的演化进程, 在忽略一颗子星演化的前提下也可以研究双星的演

化(Eggleton教授还有一个能同时演化两子星的恒星演化程序, 由于本文中研究的密近双星中一子星为致密天体, 故只需演化另一子星). 程序中关于系统轨道角动量损失的输入对双星演化结果有极其重要的影响. 传统的轨道角动量损失机制主要有以下三种.

() 引力波辐射. 对于包含中子星或黑洞等致密天体的密近双星, 引力波辐射能够有效地损失轨道角动量. 通过引力波辐射导致的轨道角动量损失率为^[5]

$$J_{\text{gr}} = -\frac{32G^{7/2}M_1^2M_2^2(M_1+M_2)^{1/2}}{5c^5a^{7/2}}, \quad (1)$$

式中 G 为引力常量, c 为真空中的光速, M_1 和 M_2 为两子星的质量, a 为由开普勒第三定律 $a=[G(M_1+M_2)/\Omega^2]^{1/3}$ 给出的双星轨道间距, Ω 是双星的轨道角速度.

() 质量损失. 双星在物质交流期间, 系统有可能发生质量损失(如致密天体的超爱丁顿吸积等). 损失的物质在离开系统时会携带部分轨道角动量.

设质量损失子星的质量为 M_1 , 吸积子星的质量

为 M_2 , 则吸积率 \dot{M}_2 与质量传输率 \dot{M}_1 之间的关系为

$$\dot{M}_2 = -(1-f)\dot{M}_1, \quad (2)$$

其中 f 为传输质量中逃离系统的比例. 假设损失物质在吸积子星附近以各向同性星风的形式离开系统, 则它们应携带吸积子星的比轨道角动量为

$$j = \frac{M_1 J}{(M_1 + M_2) M_2}, \quad (3)$$

式中 J 为双星系统的总轨道角动量, 且

$$J = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} a^2 \Omega. \quad (4)$$

结合(2)和(3)两式, 通过质量损失这种机制的轨道角动量损失率为^[6]

$$\dot{J}_{\text{ml}} = f \frac{M_1 \dot{M}_1}{(M_1 + M_2) M_2} J. \quad (5)$$

当然, 损失物质还有可能以其他方式离开双星系统, 例如从伴星、内拉格朗日点或以吸积盘盘风的形式等. 此时轨道角动量损失率的表达式与(5)式有所差别, 但量级相同.

() 磁制动. 低质量的主序单星在演化期间, 将通过恒星风与磁场的耦合损失自旋角动量而发生制动, 即磁制动^[7]. 带电粒子沿着来自恒星对流包层的磁力线运动, 由于磁冻结效应外流粒子将被束缚在磁力线上很长一段距离(约 5~10 倍恒星半径), 和恒星一起共转而使得以恒星风的形式损失的比角动量较大. 在双星系统中, 演化子星通过磁制动损失自旋角动量而自旋减慢. 然而, 系统之间潮汐力的持续作用将使得演化子星自转加速而和轨道运动同步. 自转加速是建立在消耗轨道角动量的基础之上, 因此磁制动间接带走了轨道角动量.

Rappaport等人^[8]给出了一个关于磁制动的轨道角动量损失率的经验公式, 目前在激变变星的研究中仍然广泛应用. 磁制动标准模型给出的轨道角动量损失率为

$$\dot{J}_{\text{mb}} = -3.8 \times 10^{-30} M_1 R_\odot^4 \left(\frac{R_1}{R_\odot} \right)^\gamma \omega^3 \text{ (dyn} \cdot \text{cm)}, \quad (6)$$

式中 M_1 为演化子星的质量, R_\odot 和 R_1 分别为太阳和演化子星的半径, ω 是演化子星的自旋角速度, $0 \leq \gamma \leq 4$ 是一个无量纲的参数(1 dyn=10⁻⁵ N).

然而, 许多专家在研究自旋周期小于 2.5~5 d 的低质量恒星演化时发现, 标准模型高估了角动量损失率. Sills等人^[9]得到了演化子星转速较快时磁制动

简化模型的计算公式为

$$\dot{J}_{\text{mb}} = \begin{cases} -K \omega^3 (R_1 M_\odot / M_1 R_\odot)^{1/2}, & \omega \leq \omega_c, \\ -K \omega \omega_c^2 (R_1 M_\odot / M_1 R_\odot)^{1/2}, & \omega > \omega_c, \end{cases} \quad (7)$$

式中 $K=2.7 \times 10^{47} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$, ω_c 是演化子星角动量损失达到饱和时的临界角速度. ω_c 与恒星的对流湍动时标成反比, 即 $\omega_c = \omega_{c,\odot} \tau_\odot / \tau$ ^[10]. 这一磁制动模型给出的轨道角动量损失率比(6)式中 $\gamma=4$ 时至少要低一个量级.

对于一个轨道偏心率 $e=0$ 的密近双星, 其轨道间距的演化满足^[11]

$$\frac{\dot{a}}{a} = \frac{2\dot{J}}{J} - \frac{2\dot{M}_1}{M_1} - \frac{2\dot{M}_2}{M_2} + \frac{\dot{M}_1 + \dot{M}_2}{M_1 + M_2}. \quad (8)$$

如果双星在物质交流时遵循质量守恒模式, 则有 $\dot{M}_2 = -\dot{M}_1$, (8)式可简化为

$$\frac{\dot{a}}{a} = \frac{2\dot{J}}{J} - \frac{2\dot{M}_1}{M_1} (1-q), \quad (9)$$

式中 $q = M_1 / M_2$. 很明显, 双星的轨道演化与系统轨道角动量的损失密切相关.

观测上, 一部分 Algol 型双星轨道周期长期减小, 且 18 个黑洞 X 射线双星中有 9 个轨道周期小于 0.5 d^[6,12]. 因为 $\dot{M}_1 < 0$, 当物质从小质量的伴星传向大质量主星时, (9)式右边第二项对双星的轨道收缩是没有贡献的. 这些现象均表明, 密近双星在演化过程中经历了长期的轨道角动量损失. 然而, 三种传统的轨道角动量损失机制均无法拟合这些观测数据. 此外, 激变变星系统的质量传输率与轨道周期之间有一个较好的相关关系^[13]. 然而, 推断的质量传输率却没有遵循这一关系, 对给定的轨道周期约有一个量级的分布范围, 这一矛盾在超软 X 射线源发现后尤其突出. 由新星爆发、再辐射或质量损失所导致的间歇性的循环曾经被用来解释这一矛盾, 却得不到观测上的支持^[14,15]. 这些观测疑难和矛盾都预示着在传统机制以外, 还有可能存在更为有效的轨道角动量损失机制.

1 CB 盘模型

近十几年来, 有一些天体物理学家提出了环绕双星盘模型. 密近双星演化到一定阶段后, 快速演化的子星率先充满其洛希瓣, 两子星间开始进行物质交流. 双星在物质交换期间损失的一部分物质由于携带较大的轨道角动量不可能彻底离开双星系统,

可能形成一个环绕双星系统并与其轨道共面的盘状结构^[16,17]. 如果环绕双星盘(circumbinary disk, 简称CB盘)作开普勒转动, $\Omega \propto r^{-3/2}$ (r 为盘上某点到双星质心的距离), 则CB盘的角速度小于双星系统. 盘内边缘与双星之间的引力相互作用将使得双星将盘带快, 反之盘却将双星拖慢. 总的效果是CB盘与双星之间通过引力相互作用产生的潮汐矩将一部分轨道角动量从双星轨道中转移到CB盘上^[18,19].

环绕密近双星的CB盘示意图参见图1, 盘内区是热且光学厚的, 而外区是冷且光学薄的. 很明显, CB盘与致密天体周围的吸积盘有着本质的区别. 第一, 吸积盘环绕于双星中致密星的周围, 而CB盘是以双星的质心为圆心且环绕于双星系统周围. 第二, 吸积盘中的物质将通过吸积过程进入致密天体, 而双星质量交流期间流失的部分物质将不断注入CB盘. 第三, 致密天体一般会从吸积物质中获得角动量, 而双星系统却将轨道角动量通过引力相互作用转移到CB盘上. 第四, 随着盘内边缘质量的不断注入, CB盘的外半径将持续增加.

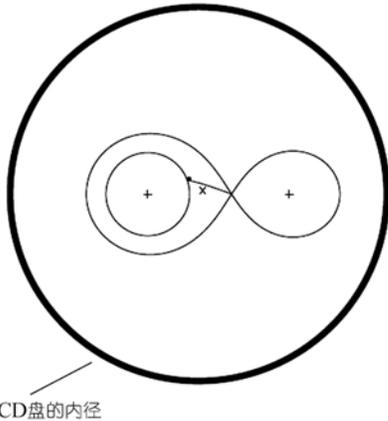


图1 密近双星轨道平面内的CB盘内边缘示意图

左右两个十字符号分别表示致密星和其伴星, 中间又叉符号表示双星的质心

2001年, Taam和Spruit在解释激变变星系统在一定轨道周期时质量传输率有一个较大的范围时, 首次研究了CB盘对双星演化的影响, 计算结果表明质量传输率受CB盘的影响较为显著^[14,15]. 如果采用与标准薄吸积盘类似的黏滞力矩^[20], 并假设引力相互作用只发生在双星和CB盘内边缘(半径为 r_i), 且从双星流入CB盘的轨道角动量输入率与其面密度成正比, 则通过CB盘导致轨道角动量的损失率为^[14,15]

$$\dot{J}_{cb} = \lambda a^2 \Omega_c \delta \dot{M}_1 \left(\frac{t}{t_{vi}} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

式中 $\lambda = (r_i/a)^{1/2}$, δ 为传输质量中注入CB盘的质量比例, Ω_c 为CB盘的开普勒转动角速度, t 为质量传输时标. (10)式中CB盘内边缘的黏滞时标 $t_{vi} = 4\lambda^3 r_i^2 / 3\alpha \Omega_c h_i^2$, 这里 α 为黏滞参数(通常取 $\alpha = 0.01 \sim 0.001$)^[20], h_i 为盘内边缘的标高. Artymowicz和Lubow^[21]研究了偏心双星同CB盘的引力相互作用, 发现双星轨道偏心率 $e = 0$ 时CB盘内半径满足 $r_i/a \sim 1.7$, 这一尺度与平滑粒子流体动力学模拟的结果基本一致. 通常认为CB盘是几何薄的, 其内边缘标高通常取 $h_i \approx 0.03r_i$.

2 CB盘对白矮星双星演化的影响

为了了解通过CB盘损失轨道角动量相对于传统机制的优势, 我们利用Eggleton教授的恒星演化程序计算了由 $M_{wd} = 1M_\odot$ 的CO白矮星和 $M_d = 2M_\odot$ 的主序或亚巨伴星组成的白矮星双星的演化, 其初始轨道周期为1d. 程序中重要的输入物理阐述如下.

随着伴星的核演化或由于磁制动等传统机制损失轨道角动量, 经过约 7.38×10^8 a后伴星开始充满其洛希瓣, 于是双星之间开始了物质交流. 白矮星的质量是否有效增加取决于吸积物质中氢转变为其他重元素的质量积累效率 α . 如果质量传输率 \dot{M}_d 高于临界值,

$$\dot{M}_{cr} \approx 5.3 \times 10^{-7} \left(\frac{1.7-X}{X} \right) \left(\frac{M_{wd}}{1M_\odot} - 0.4 \right) M_\odot \text{ a}^{-1}, \quad (11)$$

式中 X 为吸积物质中氢元素的质量丰度. 由于来自白矮星表面的强光学厚星风的损失, 吸积氢将以临界值 \dot{M}_{cr} 的质量转化率转化为氦. 当质量传输率小于 $\dot{M}_{cr}/8$ 时, 强烈的氢壳层闪耀将发生, 此时没有氢元素积累^[22]. 其他情形下都认为所有的氢元素将通过稳定的核燃烧生成氦元素, 即氢元素的质量转化效率为

$$\alpha_H = \begin{cases} -\dot{M}_{cr}/\dot{M}_d, & -\dot{M}_d > \dot{M}_{cr}, \\ 1, & \dot{M}_{cr} \geq -\dot{M}_d \geq \dot{M}_{cr}/8, \\ 0, & -\dot{M}_d < \dot{M}_{cr}/8. \end{cases} \quad (12)$$

随着白矮星表面氦层质量的逐渐增加, 氦闪将发生.

由于氦闪的发生,一部分包层物质将被吹离白矮星^[23]. 至于氦元素的积累效率,我们采取由Hachisu和Han等人^[24,25]所给的形式:

$$\alpha_{\text{He}} = \begin{cases} -0.175(\log \dot{M}_{\text{He}} + 5.35)^2 + 1.05, & -7.3 < \log \dot{M}_{\text{He}} < -5.9, \\ 1, & -5.9 < \log \dot{M}_{\text{He}} < -5. \end{cases} \quad (13)$$

综上所述,CO白矮星表面的质量增长率为 $\dot{M}_{\text{wd}} = -\alpha_{\text{H}}\alpha_{\text{He}}\dot{M}_{\text{d}}$, 双星系统的质量损失率为 $\dot{M} = (1 - \alpha_{\text{H}}\alpha_{\text{He}})\dot{M}_{\text{d}}$.

我们假设系统质量损失的一小部分比例 $\delta = 0.01$ 在CB盘的内半径 r_i 处注入CB盘,且CB盘的相关参数选取如下: $\alpha = 0.01$, $\lambda = 1.3$, $h_i/r_i = 0.03$. 随着CB盘内边缘面密度的有效增加,盘与双星之间通过引力相互作用产生的潮汐矩对双星系统进行有效制动,从双星中提取轨道角动量. 此外,对系统质量损失 \dot{M} 的剩余部分 $1 - \delta$, 假设它们在白矮星附近以各向同性星风或外流的形式离开系统,带走了白矮星的比轨道角动量.

当白矮星的质量超过 $1.4M_{\odot}$ 的Chandrasekhar质量极限时,我们假设Ia型超新星爆发发生,并让程序停止计算. 程序的数值计算结果参见图2和3. 图2给出了白矮星双星系统中两子星的质量的演化轨迹. 从图中可以看出,考虑了CB盘效应后,质量传输时标大大缩短,从 $>1.8 \times 10^6$ a 减为 $<1.5 \times 10^6$ a. 也就是

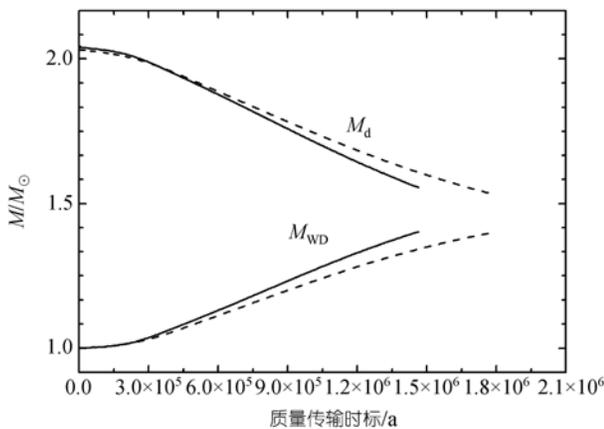


图2 白矮星双星中白矮星质量和其伴星质量随质量传输时标的演化轨迹

实线和虚线分别表示 $\delta = 0.01, 0$ 两种情形(即考虑了CB盘和没有考虑CB盘两种情形)

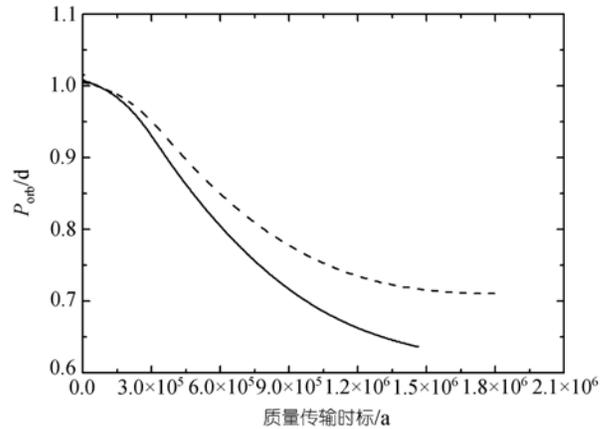


图3 白矮星双星的轨道周期随质量传输时标的演化轨迹
实线和虚线分别表示 $\delta = 0.01, 0$ 两种情形

说, CB盘的存在可以加速双星的演化并提高质量传输率.

图3中我们给出了白矮星双星的轨道周期随质量传输时标的演化. 很明显,有CB盘存在时双星的轨道周期可减小至0.6 d,而传统的轨道角动量损失机制只可以使周期减到约0.7 d并到达一个平台区. 这一结果表明CB盘的存在可使得双星轨道持续收缩.

3 CB盘的理论研究与观测进展

近年来,关于CB盘的研究还主要停留在理论探讨阶段. Taam等人系统计算了约200个激变变星系统的演化,发现对一个较低的质量输入比例 $\delta (10^{-5} \sim 10^{-3})$, CB盘可提高质量传输率于 $10^{-10} \sim 10^{-8} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$ 这个与观测吻合较好的范围^[26]. 受Taam和Spruit先驱性工作的启发,我们在研究Algol型双星和黑洞中等质量X射线双星演化时考虑了CB盘效应后,发现对一个合适的质量输入比例 δ , CB盘会促使双星轨道周期持续减小,演化的最终结果是一个短轨道周期(小于0.5 d)的致密双星系统^[6,12]. 同时我们还发现, CB盘可有效地提高双星间的质量传输率,从而解释有长时间延迟(Ia型超新星前身星系统形成与其爆发之间的时间差称为时间延迟. 最近,高红移超新星的观测得到了2~4 Ga的平均时间延迟,这要求吸积白矮星的伴星是一个大约 $1.5M_{\odot}$ 的恒星,而以前的单简并星模型中伴星质量的最小值约为 $2M_{\odot}$)的Ia型超新星前身星的存在^[27]. Willems等人利用星族合成方法研究短轨道周期激变变星 ($P_{\text{orb}} < 2.75$ h) 的轨道周期分布时,发现考虑通过CB盘损失轨道角动量这一机制后,轨道周期

的最小值位于 80 min 附近, 且激变变星数目随周期单调增加并在 90 min 左右达到最大. 因此他们建议发现 CB 盘的最佳系统应位于周期空隙 (period gap, 2.25 ~ 2.75 h) 以下且接近最小周期, WZ Sge ($P_{\text{orb}} = 76$ min) 以及其他满足条件的系统应该给予更多的观测关注^[28,29]. 最近, 他们又研究了长周期 ($P_{\text{orb}} > 2.75$ h) 激变变星的演化, 并建议类新星激变变星是在波长 $\lambda = 10 \mu\text{m}$ 波段探测 CB 盘的最佳候选天体^[30].

近年来观测技术日新月异, CB 盘的间接观测也有所突破. 2002 年, Dubus 等人^[31]通过计算 CB 盘的谱能量分布来研究几何薄 CB 盘的结构和演化, 他们发现如果 CB 盘是黑体辐射为主导, 则其流量的峰值在 $3 \mu\text{m}$ 附近. 2004 年, Dubus 等人^[32]研究了 SS Cyg 在 $11.7 \mu\text{m}$ 波段和 AE Aqr 在 $17.6 \mu\text{m}$ 的观测后, 建议 CB 盘在远红外和亚毫米波段探测是可能的. Mouchet 等人^[33]在观测 BY Cam 这一系统时发现沿视线方向分子氢拥有反常高的柱密度, 他们认为可能存在冷物质环绕该系统. Jura^[34]研究 HD 233517 不同寻常的大比例红外超时, 发现环绕该系统轨道运动的尘埃盘可以解释其观测特征, 推测这一尘埃盘很可能起源于 HD 233517 演化为红巨星时一颗低质量伴星卷入的结果, 并估计盘的外半径和质量分别为 ~ 45 AU 和 $\sim 0.01 M_{\odot}$. 然而, Belle 等人^[35]分析了 HST (Hubble Space Telescope)/STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph) 对 7 个激变变星的观测数据, 并未发现有 CB 盘存在的确切证据. Ibanoglu 等人^[36]分析了 74 个相接和 61 个半相接 Algol 型双星的数据, 他们发现半相接 Algol 型双星中轨道周期大于和小于 5 d 的系统即使有相同的质量比, 但后者轨道角动量明显小于前者, 这意味着这些系统在快速质量交流期间有显著的轨道角动量损失, 因此他们建议 CB 盘可能是一个候选机制. Munro 和 Mauerhan^[37]研究了黑洞低质量 X 射线双星 A 0620.00 和 XTE J1118+480 的黑体谱, 发现推断的中红外波段剩余辐射的区域是双星轨道间距的两倍. 因而, 来自于黑洞低质量 X 射线双星中红外波段的剩余辐射提供了在其周围有 CB 盘存在的间接证据. Howell 等人^[38]和 Brinkworth 等人^[39]在分析 Spitzer 红外卫星对磁激变变星的观测数据时, 分别发现四颗和五颗高偏振星在中红外波段流量密度偏大, 他们认为 CB 尘埃盘可能是 $8 \mu\text{m}$ 波段剩余辐射最佳来源 (当然, 也不能完全排除光学薄回旋辐射的可能性). 最近, Dubus 等人^[40]也发现来自磁激变变星 AE Aqr 的

红外辐射明显超过其伴星的估计预期, 他们建议来自 CB 盘的热辐射可以作为一个候选机制. 以上的一些观测给出了部分密近双星周围有环绕的冷气体盘存在的间接证据.

关于 CB 盘模型最重要的检验莫过于直接探测到其存在. 然而, 这一观测却并非易事. CB 盘的光度来自于它施加于双星上的力矩. 若这一力矩为 T_e , 则 $L_e = \Omega T_e$. 如果双星所受的力矩中来自 CB 盘的占主导, 则可以得到 CB 盘光度 L_e 与吸积光度 L_a 之比为^[15]

$$\frac{L_e}{L_a} \approx \frac{r_1}{a} \delta \approx 10^{-2} \delta \sim 10^{-5} - 10^{-3}. \quad (14)$$

如此低光度的 CB 盘在一个很明亮的吸积盘背景下能否被探测到有赖于它的谱能量分布. 当吸积率约为 $10^{-8} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$, 吸积光度和 CB 盘光度分别为 $L_a \approx 10^{35}$ erg/s 和 $L_e \approx 10^{30} \delta / 0.001$ erg/s ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$). 因为 CB 盘的面密度和切变率随半径下降, 所以对 L_e 的主要贡献来自于其内边缘. 对一个轨道周期为 3.5 h 的双星系统, CB 盘的有效辐射面积的量级为 $A \approx \pi r_1^2 \approx 6 \times 10^{22} \text{ cm}^2$. 因此 CB 盘的有效温度约为 1000 K, 由于尘埃辐射的持续贡献, CB 盘可能会在 L 波段探测到^[15].

鉴于以上原因, 直接观测到 CB 盘的工作很少. 1996 年, 在 GG Tau 这个低质量的前主序双星系统周围探测到可靠的双星星周物质存在, 其结果与动力学预测较为一致^[41]. 在这个四星系统 (由两个密近双星组成) 中靠北的双星周围发现一个较大的转动尘埃环. 通过分析这一观测源 2.6 mm 的连续谱数据及 $^{13}\text{CO} (J = 1 \rightarrow 0)$ 谱线轮廓, Dutrey 等人^[42]得到其北部的双星周围环绕着一质量 $\sim 0.13 M_{\odot}$ 开普勒转动的盘 (包含气体和尘埃), 该环的内外半径分别约为 180 和 800 AU.

当然, 目前 CB 盘模型在理论上还存在许多有待解决的问题. 首先, 双星质量交流期间物质进入 CB 盘的机制仍不确定. 通常认为在质量交流期间, 外流物质带有较高的轨道角动量, 它们中一部分不会彻底离开双星系统, 而将形成一个环绕双星系统的薄盘, 即 CB 盘. Cao 和 Spruit^[43]曾提出双星发生物质交流时, 一部分外流物质在轨道平面内将形成慢星风. 构成 CB 盘的物质可能来自于伴星的星风, 吸积盘的盘风、外流或爆发, 或洛希瓣内拉格朗日点的质量损失. 对来自亮激变变星 (类新星变星、矮新星爆发和超软 X 射线源) 紫外和光学共振线的研究获得了有质量

外流的证据^[44]。当然,也不能排除CB盘是双星公共包层演化阶段未完全驱散的包层遗迹的可能。从一些与观测吻合较好的计算中 δ 的取值来看排除了CB盘恒星风的起源,因为这要求中等和低质量伴星有一个不合理的高星风损失率^[6]。我们推测吸积盘的盘风和外流可能在形成黑洞X射线双星的CB盘上充当了一个重要角色,因为黑洞双星的X射线在吸积盘上的再辐射比激变变星更有效。这一点也可以解释为什么我们在黑洞X射线双星的工作^[6]中所取的 δ 值要比激变变星中高2~3个量级^[14,15]。其次,目前的理论工作中通常假定传输物质中比例为 δ 的部分注入CB盘,实际上 δ 的值并不一定是常数。此外,对不同的系统 δ 也不相同,Taam等人曾建议 δ 是平均质量传输率的函数^[26]。最后,CB盘并不一定在双星演化过程中始终存在,例如新星爆发过程中会使其损失部分物质或将其摧毁。

4 结论

结合我们所作的工作,本文简要介绍了环绕双星盘近年来的研究进展。通过CB盘和密近双星之间的引力相互作用产生的潮汐矩可以有效地将双星中的轨道角动量转移到盘上。CB盘的存在可以提高两子星之间的质量传输率,并加速双星的演化进程。我们对白矮星双星演化的数值计算表明,通过CB盘从双星系统中提取轨道角动量比三种传统机制更为有效。轨道角动量的演化对密近双星的演化至关重要,因此对CB盘的理论研究和观测必然会为现行较为成熟的恒星演化理论补充新鲜的血液。当然,由于CB盘的辐射光度远远低于致密天体周围吸积盘的吸积光度,它有可能在L波段被观测到。迄今为止,关于CB盘较为直接的观测证据并不多。我们相信,随着观测技术的不断改善和提高,在不久的将来会在更多密近双星周围探测到环绕双星盘存在。

参考文献

- 1 刘学富,彭松泉,茶光伟. 食双星 31 Cyg 1982 年食期间的视向速度和大气食效应. 科学通报, 1984, 29(9): 544—547
- 2 王建民,刘清耀,徐树山. 关于 W UMa 型双星中以较差自转为机制的能量转移过程研究. 科学通报, 1992, 37(15): 1366—1369
- 3 Eggleton P P. The evolution of low mass stars. Mon Not R Astron Soc, 1971, 151: 351—364
- 4 Eggleton P P. Composition changes during stellar evolution. Mon Not R Astron Soc, 1972, 156: 361—376
- 5 Landau L D, Lifshitz E M. The Classical Theory of Fields. Oxford: Pergamon Press, 1962
- 6 Chen W C, Li X D. Evolution of black hole intermediate-mass X-ray binaries: the influence of a circumbinary disc. Mon Not R Astron Soc, 2006, 373: 305—310 [\[DOI\]](#)
- 7 Verbunt F, Zwaan C. Magnetic braking in low-mass X-ray binaries. Astron Astrophys, 1981, 100: L7—L9
- 8 Rappaport S, Verbunt F, Joss P C. A new technique for calculations of binary stellar evolution, with application to magnetic braking. Astrophys J, 1983, 275: 713—731 [\[DOI\]](#)
- 9 Sills A, Pinsonneault M H, Terndrup D M. The angular momentum evolution of very low mass stars. Astrophys J, 2000, 534: 335—347 [\[DOI\]](#)
- 10 Kim Y C, Demarque P. The theoretical calculation of the Rossby number and the “nonlocal” convective overturn time for pre-main-sequence and early post-main-sequence stars. Astrophys J, 1996, 457: 340—347 [\[DOI\]](#)
- 11 Tauris T M, Savonije G J. Formation of millisecond pulsars I. Evolution of low-mass X-ray binaries with $P_{\text{orb}} > 2$ days. Astron Astrophys, 1999, 350: 928—944
- 12 Chen W C, Li X D, Qian S B. Orbital evolution of Algol binaries with a circumbinary disk. Astrophys J, 2006, 649: 973—978 [\[DOI\]](#)
- 13 Patterson J. The evolution of cataclysmic and low-mass X-ray binaries. Astrophys J Suppl Ser, 1984, 54: 443—493 [\[DOI\]](#)
- 14 Spruit H C, Taam R E. Circumbinary disks and cataclysmic variable evolution. Astrophys J, 2001, 548: 900—907 [\[DOI\]](#)
- 15 Taam R E, Spruit H C. The evolution of cataclysmic variable binary systems with circumbinary disks. Astrophys J, 2001, 561: 329—336 [\[DOI\]](#)
- 16 van den Heuvel E P J, Loore C. The nature of X-ray binaries. Evolution of massive close binaries with one collapsed component— with a possible application to Cygnus X-3. Astron Astrophys, 1973, 25: 387—395
- 17 van den Heuvel E P J. Interacting Binaries. Berlin: Springer, 1994
- 18 Eggleton P P, Pringle J E. Possible evolution of a triple system into Epsilon Aurigae. Astrophys J, 1985, 288: 275—276 [\[DOI\]](#)
- 19 Pringle J E. The properties of external accretion discs. Mon Not R Astron Soc, 1991, 248: 754—759
- 20 Shakura N I, Sunyaev R A. Black hole in binaries system. Observational appearance. Astron Astrophys, 1973, 24: 337—355

- 21 Artymowicz P, Lubow S H. Dynamics of binary-disk interaction. 1: Resonances and disk gap sizes. *Astrophys J*, 1994, 421: 651—667 [DOI](#)
- 22 Kovetz A, Prialnik D. Accretion onto a 1.4 solar mass white dwarf: Classical nova, recurrent nova, or supernova? *Astrophys J*, 1994, 424: 319—332 [DOI](#)
- 23 Kato M, Saio H, Hachisu I. Stellar wind during helium nova outburst. *Astrophys J*, 1989, 340: 509—517 [DOI](#)
- 24 Hachisu I, Kato M, Nomoto K A. New evolutionary path to Type Ia supernovae: A helium-rich supersoft X-ray source channel. *Astrophys J*, 1999, 519: 314—323 [DOI](#)
- 25 Han Z, Podsiadlowski Ph. The single-degenerate channel for the progenitors of Type Ia supernovae. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 350: 1301—1309 [DOI](#)
- 26 Taam R E, Sandquist E L, Dubus G. Cataclysmic variable evolution with circumbinary disks. *Astrophys J*, 2003, 592: 1124—1136 [DOI](#)
- 27 Chen W C, Li X D. Evolving to Type Ia supernovae with long delay times. *Astrophys J*, 2007, 658: L51—L54 [DOI](#)
- 28 Kolb U, Willems B. Population synthesis studies of white dwarf binaries. *Rev Mex A A*, 2004, 20: 101—103
- 29 Willems B, Kolb U, Sandquist E L, et al. Angular momentum losses and the orbital period distribution of cataclysmic variables below the period gap: Effects of circumbinary disks. *Astrophys J*, 2005, 635: 1263—1280 [DOI](#)
- 30 Willems B, Taam R E, Kolb U, et al. Theoretical orbital period distributions of cataclysmic variables above the period gap: Effects of circumbinary disks. *Astrophys J*, 2007, 657: 465—481 [DOI](#)
- 31 Dubus G, Taam R E, Spruit H C. The structure and evolution of circumbinary disks in cataclysmic variable systems. *Astrophys J*, 2002, 569: 395—404 [DOI](#)
- 32 Dubus G, Campbell R, Kern B, et al. Excess mid-infrared emission in cataclysmic variables. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 349: 869—881 [DOI](#)
- 33 Mouchet M, Bonnet-Bidaud J-M, Roueff E, et al. The surprising far-UV spectrum of the polar BY camelopardalis. *Astron Astrophys*, 2003, 401: 1071—1076 [DOI](#)
- 34 Jura M. A flared, orbiting, dusty disk around HD 233517. *Astrophys J*, 2003, 582: 1032—1035 [DOI](#)
- 35 Belle K E, Sanghi N, Howell S B, et al. A preliminary observational search for circumbinary disks around cataclysmic variables. *Astron J*, 2004, 128: 448—462 [DOI](#)
- 36 Ibanoglu C, Soydogan F, Soydogan E, et al. Angular momentum evolution of Algol binaries. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 373: 435—448 [DOI](#)
- 37 Muno M P, Mauerhan J. Mid-infrared emission from dust around quiescent low-mass X-ray binaries. *Astrophys J*, 2006, 648: L135—L138 [DOI](#)
- 38 Howell S B, Brinkworth C S, Hoard D W, et al. First spitzer space telescope observations of magnetic cataclysmic variables: Evidence of excess emission at 3—8 μm . *Astrophys J*, 2006, 646: L65—L68 [DOI](#)
- 39 Brinkworth C S, Hoard D W, Wachter S, et al. Spitzer space telescope observations of magnetic cataclysmic variables: Possibilities for the presence of dust in polars. *Astrophys J*, 2007, 659: 1541—1562 [DOI](#)
- 40 Dubus G, Taam R E, Hull C, et al. Spitzer space telescope observations of the magnetic cataclysmic variable AE Aquarii. *Astrophys J*, 2007, 663: 516—521 [DOI](#)
- 41 Roddier C, Roddier F, Northcott M J, et al. Adaptive optics imaging of GG Tauri: Optical detection of the circumbinary ring. *Astrophys J*, 1996, 463: 326—335 [DOI](#)
- 42 Dutrey A, Guilloteau S, Simon M. Images of the GG Tauri rotating ring. *Astron Astrophys*, 1994, 286: 149—159
- 43 Cao X W, Spruit H C. Magnetically driven wind from an accretion disk with low-inclination field lines. *Astron Astrophys*, 1994, 287: 80—86
- 44 Warner B. Absolute magnitudes of cataclysmic variables. *Mon Not R Astron Soc*, 1987, 227: 23—73