

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.01.02

# 红矮星双星的质径关系难题

张 斌<sup>1,2</sup>, 朱俐颖<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 红矮星的质量一般小于  $0.8 M_{\odot}$ , 有效温度介于  $2\,500\sim 5\,000\text{ K}$  之间, 包括晚 K 型和 M 型恒星, 属于小质量晚型恒星。红矮星双星由于展现出许多独特的性质而备受天文界关注, 最为突出的有三点: 精确测量恒星半径和质量, 强烈的活动性, 以及由于存在质径关系难题而表现出与理论演化模型的不符。所谓红矮星质径关系难题, 是指观测到的恒星半径要比理论计算的大, 而有效温度却比理论计算的低, 但是光度一致。对此难题的可能解释主要包括三个方面: 恒星金属丰度, 恒星的自转以及恒星的磁场活动。随着研究的深入, 支持自转和磁场活动联合作用的证据逐渐增多, 具体的细节还在研究中。

**关 键 词:** 红矮星; 食双星; 质径关系; 磁场; 自转; 金属丰度

**中图分类号:** P144.9      **文献标识码:** A

## 1 引 言

通常而言, 红矮星的质量大于恒星质量下限而小于  $0.8 M_{\odot}$  (另有小于  $0.65 M_{\odot}$  的说法<sup>[1]</sup>), 处于主序演化阶段, 位于赫罗图主序带右下端, 因其恒星颜色偏红而得名, 包括 M 型星和晚 K 型星, 其中 M 型星居多。相比于中等质量和大质量恒星, 红矮星表现出许多不同的特点: 红矮星质量小, 主序演化时标较长, 有些甚至可以大过 137 亿年 (宇宙年龄的下限), 通常具有对流包层, 自转较快, 色球层活动频繁, 伴随有耀发和各类发射线; 红矮星双星的光谱中有中性金属线, 尤其 TiO 线, 分子带突出; 部分红矮星轨道周期也存在变化, 有研究表明, 第三天体的光时轨道效应是引起双星轨道周期发生周期性变化最可能的原因<sup>[2]</sup>; 此外, 双线分离红矮星食双星系统还是测定恒星质量和半径的最精确样本, 例如 YY Gem<sup>[3]</sup>, CM Dra<sup>[4]</sup> 和 CU Cnc<sup>[5]</sup> 等。

研究发现, 小质量恒星 (约  $1 M_{\odot}$ ) 普遍存在质径关系难题<sup>[6, 7]</sup>, 大量的科学研究表明这绝不是偶然, 即使我们采用世界上最精确的理论演化模型也不能消除这一现象。红矮星在小

收稿日期: 2015-09-22; 修回日期: 2015-11-03

资助项目: 国家自然科学基金 (11133007, 11325315, 11573063)

通讯作者: 张斌, zhangbin@ynao.ac.cn

质量恒星中占的比例高,具有一定的代表性,因此选取它来详细阐述质径关系难题。红矮星双星的质径关系难题具体表现为,对相同质量的小质量恒星,实际观测的恒星半径比用理论模型计算的要大 5%~10%,而有效温度却要低 3%~5%,但是两者光度一致。进一步的研究表明,观测波段越往近红外长波方向,这种差异则越不明显<sup>[8]</sup>。目前的恒星演化理论在大质量恒星和中等质量恒星上的应用比较成功,然而小质量恒星例外,这其中最主要的原因就是存在质径关系难题。基于这个原因,解决红矮星双星的质径关系难题便迫在眉睫。

本文第 2 章介绍红矮星双星质径关系难题的相关背景知识;第 3 章介绍红矮星双星质径关系难题的相关讨论;第 4 章进行总结和展望。

## 2 红矮星双星质径关系难题的发现和提出

从 20 世纪 90 年代开始,小质量恒星的研究逐渐受到学者的重视。在研究的过程中发现,小质量恒星半径和有效温度的测量结果,理论预测值与实际观测值之间存在一个显著的差异。红矮星质径关系难题最初是由 Hoxie<sup>[9]</sup> 在 1970 年发现的,1973 年他又做了深入研究<sup>[10]</sup>,紧接着 Lacy<sup>[11]</sup>,随后 Popper<sup>[12]</sup> 和 Clausen<sup>[13]</sup> 给出了观测上的证据。此后,越来越多的人开始关注红矮星质径关系难题,随着研究的深入,发现存在这种差异的红矮星数目也越来越多。因为红矮星双星高精度的测量数据获取困难,红矮星双星的质径关系难题直到 2006 年才由 Ribas<sup>[14]</sup> 推向研究高潮,也正是从那时候起,研究对象从红矮星单星拓展到红矮星食双星领域。其实,早在 2002 年对分离红矮星 YY Gem<sup>[3]</sup> 做深入研究时,Ribas 就已经对该问题表现出高度关注。现在的研究结果表明,质量约为  $1 M_{\odot}$  且具有对流包层的恒星都存在质径关系问题<sup>[15]</sup>,相关的研究者有时也引用半径膨胀 (radius inflation) 和温度抑制 (temperature suppression<sup>[16]</sup>) 来形容这种差异。

从时间上来说,提出这一难题不算早,主要是因为理论发展和实际观测(观测手段和技术的跟进)并不同步。在恒星理论的研究中,只有限制了恒星自由物理参量(质量、半径、有效温度、金属丰度和年龄等)的数量,才可以严格测试恒星的理论模型<sup>[14]</sup>。虽然红矮星在宇宙中数量较多,但由于它本身比较暗,而且磁活动又会导致恒星内部结构发生变化,从而使得我们难以获取其高精度的数据<sup>[17]</sup>。另外,红矮星质量和半径的测量在技术方面也存在一定困难。下面对红矮星双星质量和半径的测量进行简单介绍。

(1) 获取红矮星双星的质量主要用两种方法。第一种是借助于主序星的质光关系(主序星一旦质量确定,其半径和温度也会随之确定下来,光度也随之确定,这样,光度和质量之间就会有一个依赖关系)。除了巨星、白矮星、中子星等致密天体外,约 90% 的主序星都符合质光关系。该关系的数学近似表达式为:  $L/L_{\odot} \propto (M/M_{\odot})^{\alpha}$ 。其中,对于低质量主序星(小于  $0.3 M_{\odot}$ ),  $\alpha \approx 1.8$ ; 对中等质量主序星 ( $0.3 M_{\odot} < M < 3 M_{\odot}$ ),  $\alpha \approx 4.0$ 。在此基础上,结合开普勒第三定律:

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2}(M_1 + M_2) \quad , \quad (1)$$

通过两星的光度比可以求出其质量比,最后求出两颗星各自的质量。这种方法简单易行,但

是计算误差较大,精度不够高(约 10%)。Delfosse 等人<sup>[18]</sup>在结合恒星金属丰度模型以及视向速度观测的基础上,研究了部分恒星质量小于  $0.6 M_{\odot}$  的主序星样本,很好地改进了 V 波段和近红外波段(J, H, K)的质光关系,使其测量精度可达 0.2%~5%。另外一种方法是同时观测红矮星双星的视向速度和光度,获得系统高精度的视向速度曲线和光变曲线。视向速度是轨道倾角的函数(为圆轨道且在自转公转同步情况下),而通过分析光变曲线可以获得系统的轨道倾角,结合两者的分析结果可以精确求出系统的分光质量比,再利用开普勒第三定律就可以分别求出两子星的质量,双线分离红矮星模型的测量精度可以小于 0.3%,是目前恒星质量测量最可靠的方法。由于红矮星本身较暗,要获取高精度的观测数据不太容易,也正因如此,目前进行过高精度恒星质量测量的红矮星并不多。

(2) 经典的双线食双星恒星半径的测量需要结合其光变曲线和视向速度,但这种方法只适用于恒星质量大于  $1 M_{\odot}$  的主序星<sup>[19]</sup>。单星恒星半径的测量采用长基线干涉法,适用于亮而且大的巨星和超巨星<sup>[20]</sup>。不过现在已经有所改进。在此简要介绍有关红矮星双星半径测量的两种主要方法。第一种是干涉仪测量。根据光学干涉原理,当相距  $x$  的两架望远镜满足  $x=1.22 \lambda/\beta$  时,干涉条纹将消失,其中  $\beta$  为恒星视圆面的角直径,相当于直径为  $x$  的单口径望远镜的理论分辨率。在测得角直径的情况下,再用其他方法测得恒星到地球的距离,就可以得到恒星的半径。例如, Ségransan 等人<sup>[21]</sup>利用基线为 104 m 的两个 8 m 级望远镜,通过干涉法获得了光谱型在 M0V-M5.5 之间的 4 个红矮星的半径,测量角直径在 0.7~1.5 mas 之间,精度在 0.04~0.11 mas 之间。第二种为食双星法。这种方法和之前质量测量一样,需要同时结合分光 and 测光的分析结果。分光轨道分析可得双星轨道的偏心率  $e$  以及视向速度的半振幅  $k_1$ , 测光轨道分析可得双星系统的质量比  $q$  以及相对半径  $r_1$  和  $r_2$ , 由此可得两子星半径  $R_1, R_2$ :

$$A = 1.9763 \times 10^{-2} (1 - e^2)^{\frac{1}{2}} k_1 \left(1 + \frac{1}{q}\right) P, \quad (2)$$

$$R_1 = Ar_1, \quad R_2 = Ar_2, \quad (3)$$

其中,  $A$  为两子星间平均距离,  $P$  为轨道周期,单位为 d。这种方法测量精度高,不需要知道双星与观测者之间的距离<sup>[22]</sup>。

由于观测技术和红矮星本身的限制,红矮星双星的研究发展一直比较缓慢。红矮星双星研究现状的改观首先得益于过去数十年间天文界的热门课题——系外行星;其次,现代天文技术的发展使较暗天体的光谱的获取成为可能;此外,现在更可以采用 IR 干涉法直接测量恒星光谱型在 M 型附近的恒星半径;最后,早期过境行星研究和 GLE 行星掩食候选体也为我们提供了许多小质量恒星研究样本。由于受到以上各方面因素的影响,红矮星双星的研究才快速发展起来<sup>[14]</sup>。

在已经发现的存在质径关系难题的红矮星双星中,分离双线食双星系统占绝大多数。造成这一分布的原因有两点:其一,分离双线食双星是测量恒星质量和半径最为精确的模型,尤其两颗子星的演化状态相近的双星系统;其二,分离双星系统间两子星的演化类似于单星的演化,表 1 列出了部分存在质径关系难题的单星和单线食双星。

双线红矮星双星的分布情况也并不一致。以全对流恒星质量为界,恒星质量分布在

表 1 存在质径关系难题的部分红矮星单星和单线食双星

Name	$M/M_{\odot}$	$R/R_{\odot}$	Type	Refs
OGLE-TR-114	0.82±0.08	0.72±0.09	SB1	[23]
OGLE-TR-120	0.47±0.04	0.42±0.02	SB1	[23]
OGLE-TR-78	0.243±0.015	0.240±0.013	SB1	[23]
OGLE-TR-125	0.209±0.033	0.211±0.027	SB1	[23]
OGLE-TR-106	0.116±0.021	0.181±0.013	SB1	[23]
OGLE-TR-122	0.092±0.009	0.120±0.018	SB1	[23]
OGLE-TR-34	0.509±0.038	0.435±0.033	SB1	[24]
OGLE-TR-18	0.387±0.049	0.390±0.040	SB1	[24]
OGLE-TR-6	0.359±0.025	0.393±0.018	SB1	[24]
OGLE-TR-7	0.281±0.029	0.282±0.013	SB1	[24]
OGLE-TR-5	0.271±0.035	0.263±0.012	SB1	[24]
OGLE-TR-123	0.085±0.01	0.133±0.009	SB1	[25]
GJ 205	0.631±0.031	0.702±0.063	Single	[21]
GJ 887	0.503±0.025	0.491±0.014	Single	[21]
GJ 191	0.281±0.014	0.291±0.025	Single	[21]
GJ 551	0.123±0.006	0.145±0.011	Single	[21]
GJ 380	0.670±0.033	0.605±0.020	Single	[21, 26]
GJ 699	0.158±0.008	0.196±0.008	Single	[21, 26]
GJ 411	0.403±0.020	0.393±0.008	Single	[21, 26]
HAT-TR-205-013	0.124±0.01	0.167±0.006	SB1	[27]
T-Aur0-13378	0.37±0.03	0.37±0.02	SB1	[28]
T-Boo0-0080	0.28±0.02	0.31±0.02	SB1	[28]
T-Lyr1-01662	0.28±0.02	0.28±0.01	SB1	[28]
T-Cyg1-01385	0.43±0.02	0.40±0.02	SB1	[28]

注: Single 表示单星, SB1 表示单线分光双星 (single-lined spectroscopic binaries)。

0.30~0.35  $M_{\odot}$  以下的恒星数据分散较小, 与理论模型计算结果比较接近。然而, 恒星质量分布在 0.4~0.8  $M_{\odot}$  之间的恒星表现出较大的分散<sup>[29]</sup>。有作者对存在此差异的双星做了初步统计, 见表 2<sup>[30, 31]</sup>。

表 2 存在质径关系难题的红矮星食双星的质量、半径、有效温度和轨道周期

Object	Star	$M/M_{\odot}$	$R/R_{\odot}$	$T_{\text{eff}}/K$	$P_{\text{orb}}/d$	Type	Refs
CM Dra	A	0.231 0±0.000 9	0.253 4±0.001 9	3 130±70	1.276	SB2	[7]
	B	0.214 1±0.000 8	0.239 8±0.001 8	3 120±70			
YY Gem	A	0.599 2±0.004 7	0.619 4±0.005 7	3 820±100	0.820	SB2	[3]
	B	0.599 2±0.004 7	0.619 4±0.005 7	3 820±100			
CU Cnc	A	0.434 9±0.001 2	0.432 3±0.005 5	3 160±150	2.794	SB2	[5]
	B	0.399 2±0.000 9	0.391 6±0.009 4	3 125±150			

表 2 (续)

Object	Star	$M/M_{\odot}$	$R/R_{\odot}$	$T_{\text{eff}}/K$	$P_{\text{orb}}/d$	Type	Refs
GU Boo	A	0.610 1±0.006 4	0.627 0±0.016 0	3 920±130	0.492	SB2	[29]
	B	0.599 5±0.006 4	0.624 0±0.016 0	3 810±130			
TrES-Her0-07621	A	0.493 0±0.003 0	0.453 0±0.060 0	3 500±...	1.137	SB2	[32]
	B	0.489 0±0.003 0	0.452 0±0.050 0	3 395±...			
2MASS J05162881+ 2607387	A	0.787 0±0.012 0	0.788 0±0.015 0	4 200±...	2.619	SB2	[33]
	B	0.770 0±0.009 0	0.817 0±0.010 0	4 154±...			
UNSW-TR 2	A	0.529 0±0.035 0	0.641 0±0.050 0	... ±...	2.144	SB2	[34]
	B	0.512 0±0.035 0	0.608 0±0.060 0	... ±...			
NSVS 06507557	A	0.656 0±0.086 0	0.600 0±0.030 0	3 960±80	0.520	SB2	[35]
	B	0.279 0±0.045 0	0.442 0±0.024 0	3 365±80			
NSVS 02502726	A	0.714 0±0.019 0	0.674 0±0.060 0	4 300±200	0.560	SB2	[36]
	B	0.347 0±0.012 0	0.763 0±0.005 0	3 620±205			
T-Lyr1-17236	A	0.679 5±0.010 7	0.634 0±0.043 0	4 150±...	8.430	SB2	[37]
	B	0.522 6±0.006 1	0.525 0±0.052 0	3 700±...			
2MASS J01542930+ 0053266	A	0.659 0±0.031 0	0.639 0±0.083 0	3 730±100	2.639	SB2	[38]
	B	0.619 0±0.028 0	0.610 0±0.093 0	3 532±100			
GJ 3236	A	0.376 0±0.017 0	0.382 8±0.007 2	3 310±110	0.770	SB2	[39]
	B	0.281 0±0.015 0	0.299 2±0.007 5	3 240±110			
SDSS-MEB-1	A	0.272 0±0.020 0	0.268 0±0.009 0	3 320±130	0.410	SB2	[40]
	B	0.240 0±0.022 0	0.248 0±0.008 0	3 300±130			
BD -22 5866	A	0.588 1±0.002 9	0.614 0±0.045 0	... ±...	2.211	SB2	[41]
	B	0.588 1±0.002 9	0.598 0±0.045 0	... ±...			
GJ 2069A	A	0.432 9±0.001 8	0.490 0±0.080 0	... ±...	2.771	SB2	[42]
	B	0.397 5±0.001 5	0.330 0±0.040 0	... ±...			
NSVS 11868841	A	0.870 0±0.074 0	0.983 0±0.030 0	5 260±110	0.602	SB2	[35]
	B	0.607 0±0.053 0	0.901 0±0.026 0	5 020±110			
2MASS J04463285+ 1901432	A	0.470 0±0.050 0	0.570 0±0.020 0	3 320±150	0.630	SB2	[43]
	B	0.190 0±0.020 0	0.210 0±0.010 0	2 910±150			
NSVS 6550671	A	0.510 0±0.020 0	0.550 0±0.010 0	3 730±60	0.193	SB2	[44]
	B	0.260 0±0.020 0	0.290 0±0.010 0	3 120±65			
IM Vir	A	0.981 0±0.012 0	1.061 0±0.016 0	5 570±100	1.309	SB2	[45]
	B	0.664 4±0.004 8	0.681 0±0.013 0	4 250±130			
RXJ0239.1	A	0.730 0±0.009 0	0.741 0±0.004 0	4 645±20	2.072	SB2	[46]
	B	0.693 0±0.006 0	0.703 0±0.002 0	4 275±15			
OGLEBW3V38	A	0.44±0.07	0.51±0.04	3 500±...	0.198	SB2	[47]
	B	0.41±0.09	0.44±0.06	3 448±11			

表 2 (续)

Object	Star	$M/M_{\odot}$	$R/R_{\odot}$	$T_{\text{eff}}/\text{K}$	$P_{\text{orb}}/\text{d}$	Type	Refs
V405And	A	0.49±0.05	0.78±0.02	4 050±200	0.465	SB2	[48]
	B	0.21±0.04	0.24±0.04	3 000±300			
ASAJ011328	A	0.612±0.03	0.596±0.02	3 750±250	0.445	SB2	[49]
	B	0.445±0.019	0.445±0.024	3 085±300			
LP-133-373	A	0.34±0.014	0.33±0.02	3 058±195	1.63	SB2	[50]
	B	0.34±0.014	0.33±0.02	3 144±206			
LSPMJ1112	A	0.395 1±0.002 2	0.386 0±0.005	3 061±162	41.03	SB2	[51]
	B	0.274 9±0.001 1	0.297 8±0.005	2 952±163			
1RXSJ154727	A	0.257 6±0.008 5	0.289 5±0.006 8	...±...	3.55	SB2	[52]
	B	0.258 5±0.008	0.289 5±0.006 8	...±...			
WTS19b-2-01387	A	0.498±0.019	0.496±0.013	3 498±100	1.499	SB2	[53]
	B	0.481±0.017	0.479±0.013	3 436±100			
WTS19c-3-01405	A	0.410±0.023	0.398±0.019	3 309±130	4.939	SB2	[53]
	B	0.376±0.024	0.393±0.019	3 305±130			
WTS19e-3-08413	A	0.463±0.025	0.48±0.022	3 506±140	1.673	SB2	[53]
	B	0.351±0.019	0.375±0.02	3 338±140			
JW380	A	0.26±0.02	1.19±0.11	...±...	5.3	SB2	[54]
	B	0.15±0.01	0.90±0.10	...±...			
KOI126BC	A	0.241 3±0.003 0	0.254 3±0.001 4	...±...	1.767	SB2	[55]
	B	0.212 7±0.002 6	0.231 8±0.001 3	...±...			
MG1-646680	A	0.499±0.002	0.457±0.005	3730±20	1.638	SB2	[56]
	B	0.443±0.002	0.427±0.004	3630±20			
MG1-78457	A	0.527±0.002	0.505±0.007 5	3 330±60	1.586	SB2	[56]
	B	0.491±0.001	0.471±0.008	3 270±60			
MG1-116309	A	0.567±0.002	0.552±0.008 5	3 920±80	0.827	SB2	[56]
	B	0.532±0.002	0.532±0.006	3 810±80			
MG1-1819499	A	0.557±0.001	0.569±0.002 2	3 690±80	0.630	SB2	[56]
	B	0.535±0.001	0.500±0.008 5	3 610±80			
MG1-506664	A	0.584±0.002	0.560±0.002 5	3 730±90	1.548	SB2	[56]
	B	0.544±0.002	0.513±0.005 5	3 610±90			
MG1-2056316	A	0.469±0.002	0.441±0.002	3 460±180	1.723	SB2	[56]
	B	0.382±0.001	0.58±0.03	3 320±180			
SDSSJ001641	A	0.54±0.07	0.68±0.03	4 342±475	0.199	SB2	[57]
	B	0.34±0.04	0.58±0.03	3 889±579			
HIP96515Aa	A	0.59±0.03	0.64±0.01	3 724±198	2.346	SB2	[58]
	B	0.54±0.03	0.55±0.03	3 589±187			

注: 表中 A 为主星, B 为伴星, SB2 表示双谱分光双星 (double-lined spectroscopic binaries)。



### 3 红矮星质径关系难题的相关讨论

对于红矮星质径关系难题,简单来说,在光度一致的情况下,约 10% 的恒星半径低估值补偿了约 5% 的恒星有效温度的高估值。下面将给出研究者根据红矮星双星表现出的特别信息对这一难题的详细讨论<sup>[14]</sup>。

#### 3.1 恒星磁场活动

红矮星双星属于密近双星(其间距  $A$  与两子星半径的和  $R_1 + R_2$  之比  $A/(R_1 + R_2) \approx 1 \sim 3$ , 存在较强的相互作用,两子星间会发生质量转移,两子星演化会受此影响),两子星间存在的潮汐力和磁力会使两子星的自转与公转同步,周期较短,从几小时到几天不等。按照恒星光谱分类,红矮星属于晚型星(G, K 和 M 型星),晚型星通常具有较深的对流层和较快的自转,这两点正是磁发电机原理<sup>[59]</sup>(在快速自转且具有对流运动的恒星内,科里奥利力和对流的相互作用能够形成环状磁场)形成恒星磁场的必备条件。与太阳一个月的自转周期相比,红矮星双星的自转速度显然要快很多<sup>[60]</sup>。根据磁发电机原理,自转越快,则其产生的磁场越强,因此,红矮星双星的磁场要比太阳强很多。又因为红矮星双星两子星靠得比较近,它们之间还会产生磁化现象<sup>[61]</sup>。综合考虑到以上情况,我们得出结论,红矮星双星存在较强的磁场,并且异于单星。

由于恒星磁场的存在,恒星会表现出许多特殊的现象:谱线发射( $H\alpha$ ,  $H\beta$ , GaII H&K 等色球发射线), X 发射线,恒星表面大面积的黑子覆盖,耀斑(耀发),星风以及轨道周期发生准周期变化(磁活动周)<sup>[60]</sup>等。值得注意的是,存在质径关系难题的红矮星不同程度地表现出上述现象中的一种或几种,这样的恒星在文献中常叫做活跃星(active star)。为什么如此取名,我们仅从产生这些现象的物理机制就会知道。恒星大气中磁应力的释放会加热恒星光球层上方大气,并且导致其分层为色球层和冕层。被加热的色球层会发射许多发射线,其中 GaII 和 H&K 线是衡量晚型色球活动星活动水平的标准参量<sup>[62]</sup>;而冕层的温度更高,会发射 X 射线, X 射线几乎是存在质径关系难题红矮星双星的共同特征,有研究表明其辐射流量值比太阳要高两个数量级<sup>[63]</sup>。X 射线会在临界周期达到饱和,临界周期随着恒星质量的减小而增加,对于红矮星双星,临界周期不大于  $10 \text{ d}$ <sup>[64]</sup>。恒星内对流受到磁力的抑制会使得对流区底部的热流无法顺畅地向上传输,从而在恒星表面形成低温区——黑子。黑子是恒星表面磁场最强的部分,对太阳黑子的研究表明,每个黑子都有很强的单极磁场<sup>[60]</sup>,研究表明红矮星的黑子磁场一般在  $0.15 \sim 0.35 \text{ T}$  之间<sup>[65]</sup>。黑子的大小可由罗斯贝数(Rossby number):  $R_0 = \frac{P_{\text{rot}}}{t_0}$  来决定,  $P_{\text{rot}}$  为自转周期,  $t_0$  为对流反转时间。当  $R_0 > 0.65$  时,没有明显的光变影响;反之,则有<sup>[66]</sup>。黑子的寿命与其覆盖面积和自转速度相关<sup>[67]</sup>。当储存在磁场中的大量能量极快地释放,就会在恒星表面出现局部高温区——耀斑。有耀斑的恒星在其静态时, U 波段比 B 波段暗, B 波段比 V 波段暗<sup>[1]</sup>。Joy 和 Abt<sup>[68]</sup> 的计算表明,晚于 dM5.5 的 M 型星都是 dMe 星。该研究称,所有的 dMe 星迟早会有耀斑爆发,没有发射线的也会<sup>[69]</sup>。耀斑的峰值可以用如下公式来估算:

$$L_{\text{max}} = 2.5^{-\Delta m_A} \times L_0, \quad (4)$$

$L_0$  是双星的静态光度值,  $\Delta m_A$  是耀斑的振幅<sup>[1]</sup>。相比于 G 型星和 K 型星, M 型星更容易观测到耀斑。恒星的黑子、耀斑与太阳的类似, 有活动周期, 它们在恒星表面的大小和分布会随时间变化。此外, Shore 和 Hall<sup>[70]</sup> 通过研究发现, 红矮星也存在类似于太阳的磁活动周, 可以引起双星轨道周期的准周期变化。

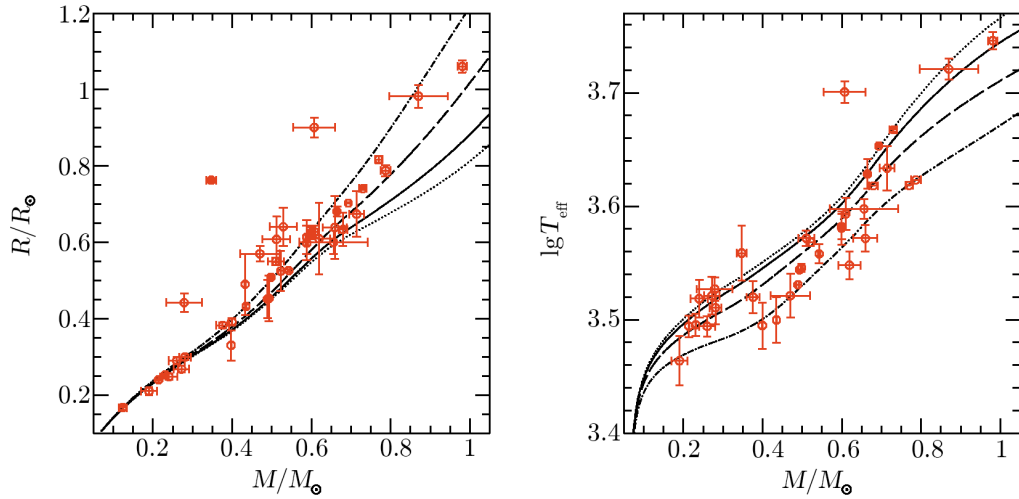
磁场对红矮星双星质径关系难题的解释首先要从小质量恒星的结构说起。目前的研究发现, 受恒星磁场<sup>[46]</sup> 的影响, 质量小于  $0.75 M_\odot$  的不活跃星可以采用标准模型进行很好的拟合, 活跃的星则不能。根据现在的恒星演化理论, 大于  $1 M_\odot$  的恒星, 恒星内部是对流的核, 呈流体静力学平衡, 恒星大气为辐射平衡; 恒星大气主要由原子构成, 其内部可以看成理想气体<sup>[19]</sup>。而小于  $1 M_\odot$  的恒星, 恒星大气主要由分子构成, 对流包层开始向外扩展, 例如,  $0.9 M_\odot$  时, 对流包层厚度为  $0.28 R$ ;  $0.4 M_\odot$  时, 对流包层厚度增加到  $0.41 R$ ;  $0.35 M_\odot$  时, 成为全对流恒星<sup>[30]</sup>。恒星内部压强增大, 温度升高, 密度也随之增加, 形成简并气体, 理想气体状态方程不再适用<sup>[8]</sup>。此时, 恒星内部是完全电离的导体, 在磁场和流体运动的作用下, 恒星内部产生电流, 从而受到洛伦兹力, 洛伦兹力反过来又会影响流体运动。在磁场的作用下, 由辐射主导的对流所引起的各向异性减弱了, 恒星内部大部分区域达到 MAC (洛伦兹力、浮力和科里奥利力) 平衡<sup>[71]</sup>, 恒星表面产生黑子。

活跃的红矮星双星通常周期较短 (小于 10 d), 自转较快 ( $10\sim 60 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 同时伴随有 H $\alpha$  和 X 发射线<sup>[14]</sup>。Ribas<sup>[14]</sup> 研究后发现, 活跃的红矮星双星由于表面黑子的覆盖降低了有效温度的测量值, 恒星通过膨胀来补偿, 以便保持总的辐射流量不变。Morales 等人<sup>[72]</sup> 则研究了另外一种特殊情况, 他们假设黑子位置靠近极区, 并且两子星黑子比较类似, 结合光变曲线对黑子做了研究, 研究得出引起红矮星双星半径膨胀三方面的原因: (1) 靠近极区的黑子破坏了红矮星的球对称性 (比例约 3%); (2) 补偿黑子引起的辐射流量的损失 (比例约 2%); (3) 快速自转导致红矮星对流效率降低 (比例约 4%)。Kraus 等人<sup>[56]</sup> 则研究了来自同一天区的 6 对短周期红矮星双星 (质量:  $0.38\sim 0.59 M_\odot$ , 周期:  $0.6\sim 1.7 \text{ d}$ ), 研究指出, 红矮星双星半径的膨胀是由于两子星间的潮汐力加快了恒星自转, 导致系统磁活动性增强, 同时抑制了恒星内部对流所致。Çakirli 等人<sup>[30]</sup> 则通过建立相应的模型, 将理论和观测数据结合起来进行模拟研究。对流受磁场的影响可以用经典混合长参数  $\alpha$  ( $\alpha = \frac{l}{H_p}$ ,  $l$  为特征长度,  $H_p$  为压强标高) 来描述, 黑子的影响可以由  $\beta$  ( $\beta = \frac{S_{\text{spot}}}{S}$ ) 因子来描述。采用零年龄主序模型 (ZAMS) 对比研究发现,  $\alpha$  主要影响恒星的有效温度,  $\beta$  因子更多地影响恒星半径。其研究所得  $M-R$  图和  $M-T$  图, 如图 1 所示。

从图 1 中可以看出, 当恒星质量在  $0.3 M_\odot$  以下时,  $M-R$  关系理论与观测的结果拟合得很好; 当恒星质量大于  $0.4 M_\odot$  时,  $M-R$  关系理论与观测的拟合结果差异则越来越大。与此同时, 随着  $\alpha$  的增大, 相应计算的有效温度也增加。若设  $\beta = \frac{S_{\text{spot}}}{S_\star}$ ,  $S_{\text{spot}}$  为有黑子覆盖的恒星表面积,  $S_\star$  为剩余的恒星表面积,  $F_{\text{spot}}$  为黑子覆盖区的表面热流量,  $F_\star = \sigma T_{\text{eff}}^4$  为无黑子区的恒星表面热流量, 考虑到  $F_{\text{spot}} < \beta F_\star$ , 则总的恒星表面热流量为:

$$F = (1 - \beta)F_\star + F_{\text{spot}} < F_\star \quad (5)$$





注：两图给出了不同混合长参数下小质量食双星的质量半径关系和质量温度关系，从图中可见，随着混合长参数的增加，有效温度也随之增高。图中的四条线代表不同的混合长参数下的拟合结果，分别是： $\alpha = 4$  (虚线)， $\alpha = 2$  (实线)， $\alpha = 1$  (短划线)， $\alpha = 0.5$  (点虚线)。

图 1 小质量双星不同混合长参数下的  $M - R$  图和  $M - T$  图<sup>[30]</sup>

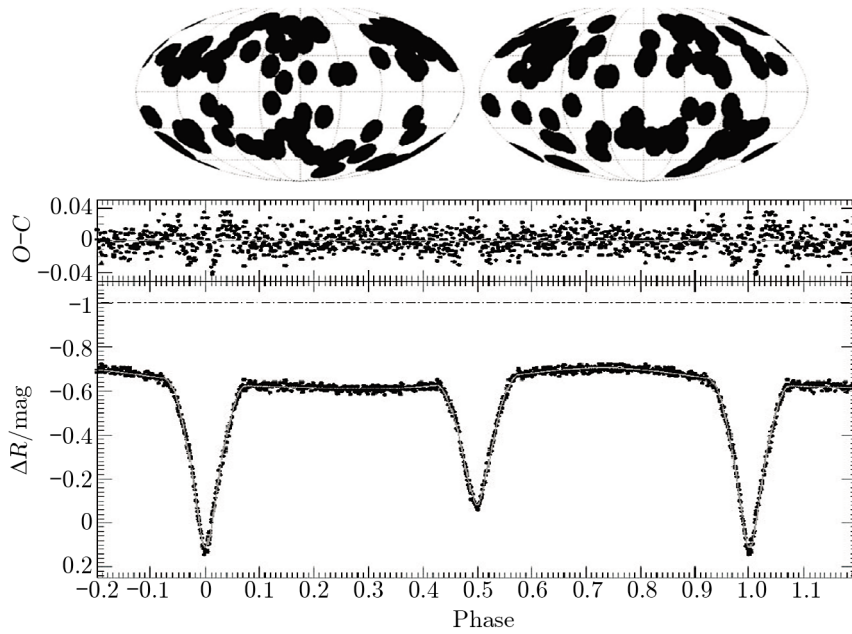
比较上式左右两边可得， $T_{\text{eff}} < T_{\text{eff}*}$ 。由此可见，黑子降低了恒星表面有效温度，使通过恒星表面辐射掉的热流量减少，考虑到恒星光度  $L$  不变 (理论计算与观测一致)，所以恒星的半径只能膨胀以增加恒星表面积，从而补偿减少的辐射热流量<sup>[71]</sup>。这样就同时解释了有效温度和恒星半径两者的差异。那么，到底恒星表面覆盖多大黑子才可以使理论计算值与观测数据相吻合呢？Chabrier 等人<sup>[71]</sup> 的研究表明， $\beta \approx 30\% \sim 50\%$  ( $\beta = \frac{S_{\text{spot}}}{S}$ ) (见图 2)；Morales 等人<sup>[72]</sup> 的研究结果为  $\beta \approx 35\%$ 。

Nefs 等人<sup>[31]</sup> 在前人研究的基础上做了较为系统全面的统计研究，研究支持 Chabrier 等人<sup>[71]</sup> 磁活动性的解释。其研究结果还表明，主星活跃的红矮星双星系统，次星不活跃，并且次星有效温度与理论计算吻合，同时得到了存在质径关系难题的红矮星双星目前较为完整的  $M - R$  图和  $M - T$  图，如图 3 所示。

### 3.2 恒星快速自转

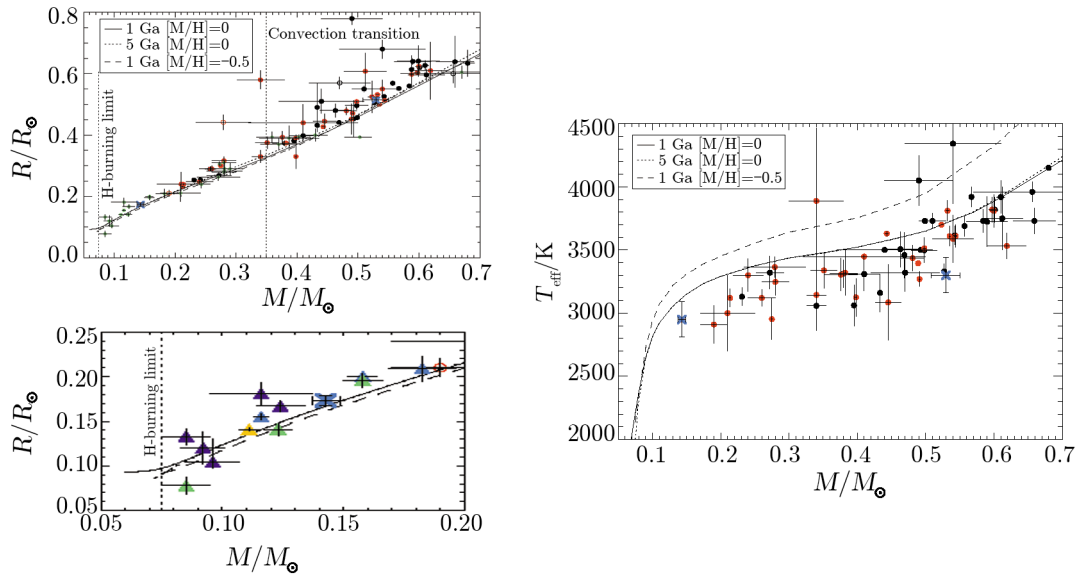
由于受到自转的影响，恒星实际上呈现为椭球体。自转的影响其实是普遍存在的，可用偏心率  $e$  来描述。通常采用恒星的极半径  $R_p$  和赤道半径  $R_e$  来定义偏心率  $e$ ： $e^2 = 1 - \left(\frac{R_p}{R_e}\right)^2$ ，此时，恒星的体积公式变为： $V = \frac{4\pi}{3} R_e^2 R_p$ 。从  $e$  的定义式可看出， $R_p < R_e$ ，可见， $R_p$  的减小同时伴随着  $R_e$  的增大，也就是说，恒星自转引起恒星赤道半径的膨胀。有研究指出，极半径的减小率会随着恒星质量的减小、活动性的增强而增大，对红矮星而言  $\frac{\Delta R_p}{R_p} \approx 6\% \sim 10\%$ ，但是， $R_e$  的变化并没有那么大，需要考虑恒星不透明度以及中心核产能率的影响<sup>[73]</sup>。

除了上述自转效应的影响外，恒星自转还可以通过影响恒星内部对流来使恒星半径



注: 在  $\beta = 0.2 \left( \beta = \frac{S_{\text{spot}}}{S} \left[ 1 - \left( \frac{T_{\text{eff-spot}}}{T_{\text{eff}}} \right)^4 \right] \right)$  时,  $R$  波段的拟合光变曲线, 及其  $O - C$  残差。

图 2 高覆盖率黑子及其光变曲线<sup>[71]</sup>



注: 左边的虚线代表恒星临界质量  $0.075 M_{\odot}$ , 中间的虚线代表全对流恒星质量  $0.35 M_{\odot}$ , 黑点代表主星, 红点代表伴星, 绿点代表使用别的方法测量了质量和半径的红矮星。紫色、蓝色和黄色三角形分别代表双星系统中主星为 G/F 型星、白矮星、亚矮星 B 型星的红矮星伴星, 绿色三角形代表单星。图中的三条线为使用 Chabrier 和 Baraffe<sup>[78]</sup> 模型在不同年龄和金属丰度下理论计算结果。

图 3 双星红矮星双星的  $M - R$  关系图和  $M - T$  关系图<sup>[31]</sup>

膨胀。和远距双星 (wide binaries) 以及单星比较, 红矮星双星活动性更强<sup>[74]</sup>, 这是因为红矮星双星两子星间较强的潮汐力和磁力会加快恒星的自转<sup>[75]</sup>。Chabrier 等人<sup>[71]</sup> 研究称, 活跃的小质量食双星通常自转周期  $P \leq 3$  d, 自转速度  $v_{\text{rot}} \geq 10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 因而观测结果相比于同质量恒星更红、更冷<sup>[76]</sup>。红矮星内部典型的对流时标 (convective time scales):  $t_{\text{conv}} \approx \frac{H_P}{v_{\text{conv}}} \approx \frac{10^9}{10^2 \sim 10^3} \approx 10^6 \sim 10^7 \text{ s}$ ,  $H_P$  为压力标高 (pressure scale height)。由此可计算罗斯贝数:  $R_0 = \frac{P}{t_{\text{conv}}} \leq 10^{-2}$ 。当罗斯贝数如此小时, 泰卜定理 (Taylor-Proudman theorem) 指出, 流体运动会受到限制在柱状或者特征长度与自转轴垂直的小层片结构中。尽管泰卜定理还没有确切地应用到粘度有限的球状物体上, 但是不能忽略自转对恒星内部对流运动的影响, 这是因为旋转会导致对流各向异性模式, 大部分的流体运动会沿着自转轴的柱状方向, 其他方向则会受到抑制<sup>[77]</sup>。总的来说, 流体运动受到抑制方向上的特征长度减小, 平均的对流速度振幅也减小, 热对流运输恒星内部热量的效率也跟着降低。根据由此产生的结果 (见图 4), Chabrier 等人<sup>[71]</sup> 分两方面做了详细讨论。

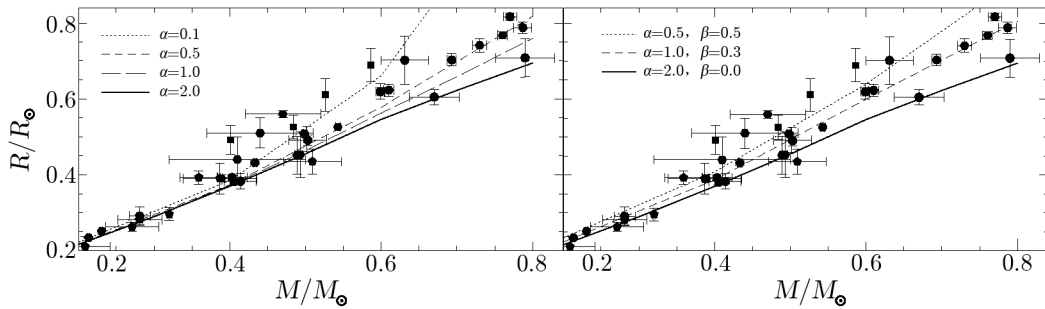


图 4 年龄为 1 Ga 的小质量 M 型星的  $M - R$  关系图<sup>[71]</sup>

一方面, 质量小于约  $0.35 M_{\odot}$  的红矮星是全对流的<sup>[78]</sup>, 而对流是近乎绝热的, 因此改变混合长参数会适度影响恒星对流。对流的绝热性会随着恒星质量的增加而增加, 特别是恒星最外面的地方, 绝热性的增强会导致对流效率的降低。这些减小的对流须通过热辐射把大部分热量传输到恒星表面, 这一过程会直接导致恒星由中心到大气层产生一个陡峭的热梯度, 恒星表面有效温度降低。有效温度的降低使得恒星的光度也随之降低, 中心核需要产生更多能量来维持恒星热平衡, 这样恒星中心温度升高, 使得恒星膨胀, 恒星半径增大<sup>[71]</sup>。

另一方面, 通过对恒星表面黑子的研究发现, 只有当  $\alpha=1$ ,  $\beta \approx 30\% \sim 50\%$  ( $\beta = S_{\text{spot}}/S$ ) 时, 才可以很好地拟合观测到的恒星半径, 其误差在  $1\sigma$  以内。通过综合比较研究, Chabrier 等人<sup>[71]</sup> 认为, 覆盖在恒星辐射表面的黑子主要影响恒星的演化状态, 同时还指出, 恒星的状态方程和不透明度问题不是产生红矮星质径关系难题的原因。

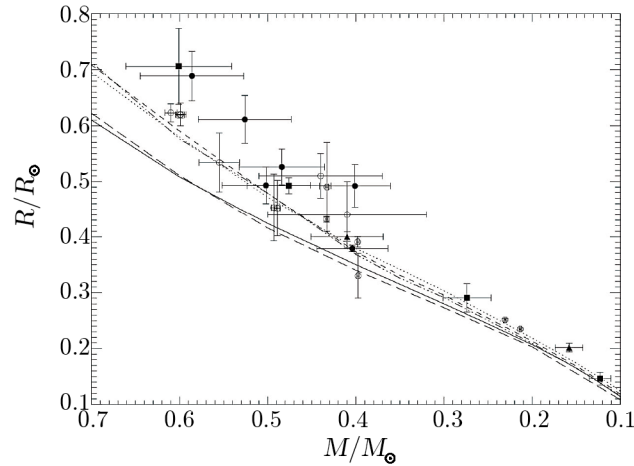
### 3.3 恒星金属丰度

恒星的金属丰度是指恒星中除氢和氦以外的所有元素的原子总数或总质量的相对含量。Berger 等人<sup>[20]</sup> 采用 IR 干涉法测量了 6 个 M 型星的半径, 并且测量了其 K 波段角直径,

通过比较其 K 波段理论计算和观测流量, 获得了一个间接的有效温度计算公式:

$$Ks = -2.5 \lg F_\lambda - 5 \lg \theta_{LD} + 17.157, \quad (6)$$

其中,  $Ks$  为 2MASS  $Ks$  波段星等,  $F_\lambda$  为对应波段的模型流量,  $\theta_{LD}$  为临边昏暗角直径。由于  $F_\lambda$  是有效温度  $T_{\text{eff}}$  的函数, 因此通过上式可以计算恒星的有效温度。需要指出的是, 这 6 个 M 型星并没有表现出特别的磁活动性质。观测到适中的恒星核 X 射线和正常色球层的  $H\alpha$  线。换言之, 这 6 个 M 型星是不活跃的。他们采用不同数值的金属丰度进行了拟合, 结果如图 5 所示。



注: 小质量矮星的质径关系, 其中点表示长基线测量单星数据, 圈表示分光光度法测量的食双星数据。图中的 5 条线分别表示: 点虚线表示  $[M/H]=0$ <sup>[78]</sup>; 短虚线表示  $[M/H]=-0.5$ <sup>[78]</sup>; 双点虚线表示  $[M/H]=-1.0$ <sup>[78]</sup>; 实线表示  $[M/H]=0$ <sup>[79]</sup>; 长虚线表示  $[M/H]=-0.3$ <sup>[79]</sup>。

图 5 不同金属丰度下  $M - R$  关系的拟合结果<sup>[20]</sup>

Berger 等人<sup>[20]</sup>的研究结果表明, 对于贫金属的恒星, 观测的半径与理论计算结果比较吻合, 随着恒星金属丰度的增加, 观测所得半径值与理论计算所得两者的差别越来越大, 最大差别甚至达到了约 20%。Leggett 等人<sup>[80]</sup>也得到了类似的结论, 他们的研究结果如图 6 所示。Berger 等人<sup>[20]</sup>认为, 这是由于恒星金属丰度与其不透明度 (与辐射频率无关的平均吸收系数) 密切相关。随着恒星金属丰度的增加, 恒星大气的分子数密度也随之增加, 这会使恒星辐射愈加困难, 恒星只好膨胀以增加有效辐射面积, 来维持辐射平衡<sup>[81]</sup>。而现在的恒星演化模型对红矮星不透明度的来源估计不足, 从而使观测上金属丰度高的恒星所算出的测量半径偏大。

Berger 等人<sup>[20]</sup>的研究所使用的是 Baraffe<sup>[82]</sup>的恒星演化模型, 该模型可以很好地拟合恒星的质量—星等关系和质量—光度关系。Baraffe<sup>[83]</sup>发现, 他们的模型 (年龄为 1 Ga, 金属丰度  $z = 0.02$ , 混合长参数  $\alpha = 1.0$ ) 在温度低于 3 700 K 时, 计算的色指数  $V - I$  比观测所得要更蓝。需要指出的是, Berger 等人<sup>[20]</sup>研究的目标为旋转较慢的红矮星单星, 是否也适用于红矮星双星系统还有待进一步的研究。目前已估算出金属丰度值的红矮星双星比较少,

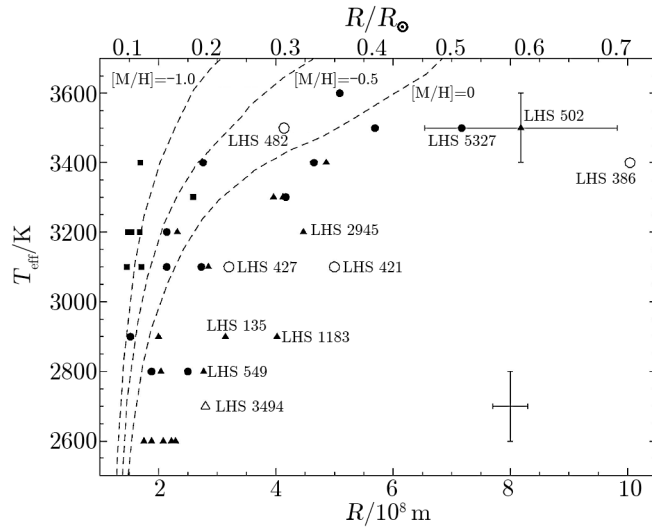


图 6 不同金属丰度下采用 Chabrier 等人<sup>[78]</sup> 的模型拟合所得 M 型星  $R-T$  图<sup>[80]</sup>

对此做了估算的红矮星双星，所用方法也是间接的<sup>[46]</sup>。对于那些质量大于  $0.35 M_{\odot}$  且旋转速度较慢的双星 (slow rotators binaries)，金属丰度和恒星半径有极强的相关性，通常其典型的旋转速度小于  $5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，RW Lac 和 HS Aur<sup>[84]</sup> 就是这种情况的例子<sup>[85]</sup>。最新的研究表明，金属丰度对红矮星半径的影响主要集中在非全对流恒星上<sup>[86]</sup>。

#### 4 总结与展望

综上所述，质量在  $1 M_{\odot}$  附近，自转周期在 10 d 以内，并且有对流包层的红矮星 (无论单星还是双星)，大都存在质径关系难题，换言之，存在质径关系难题的红矮星主要是活跃星。现在大多数研究人员倾向于红矮星的磁场和快速自转联合作用，认为其可以解释该难题。根据发电机原理，红矮星内部的对流运动和较差自转会生成较强的磁场。磁场的存在会降低恒星内部对流热传输的效率，同时在恒星表面形成黑子，磁场越强，对流受磁场的抑制越明显，产生的黑子表面积也越大。恒星表面大面积的黑子覆盖首先会降低有效温度，这相当于减小了恒星的辐射表面积，由于观测到的恒星光度是一致 (热辐射流量) 的，所以要保持恒星总的辐射流量不变，恒星就要膨胀，因而恒星半径增大。对于全对流恒星，大气热流近乎绝热，磁场抑制对流的作用减弱，因而与观测符合得较好。金属丰度的解释似乎更适用于不活跃星。虽然对这一解释的支持者比较少，但现在不能排除，因为很多红矮星双星的金属丰度是未知的，至于红矮星金属丰度对不透明度的影响，以及现在的恒星演化模型是否忽略了部分不透明度的来源问题，我们还需要做进一步的研究。

红矮星双星的质径关系难题自从被提起就备受关注。虽然对红矮星这一难题的研究已有 10 多年，但是到目前为止，这一难题仍未彻底解决，主要是因为存在以下几个问题：(1) 红矮



星双星的样本数量及其测量精度。虽然红矮星在宇宙中数量众多, 在银河系中占到 70% 左右, 但本文中统计的红矮星双星数量仅有 40 对, 这一数字和宇宙中红矮星的数量比起来显得微乎其微; 因此, 质径关系难题是否普遍存在于红矮星中, 现在下结论为时尚早。另外, 高精度的测量要求——对恒星质量和半径的测量误差须在 3% 以内, 只有这样才可以起到限制理论演化模型的作用。显然, 两子星演化状态相近的分离红矮星双线食双星是最佳的测量标本, 但问题是, 这一测量需要同时结合视向速度和光变曲线测量, 由于红矮星小而暗, 给观测带来了困难; 而且, 研究中用到的数据来自多种方式的测量, 精度很难保持一致。(2) 自转与公转同步的假设。Strassmeier 等人<sup>[87]</sup>的研究结果表明, 其研究样本中 76% 的活跃双星是同步的, 两星在圆轨道上运动, 但是 24% 的双星是不同步的, 这其中有一半  $P_{\text{rot}} > P_{\text{orb}}$ , 且轨道偏心率  $e > 0$ , 其原因是磁引导风产生制动力矩导致潮汐能耗散, 潮汐能耗散使得自转减慢。自转周期会随着有效温度的降低而增加,  $P_{\text{rot}} \propto T_{\text{eff}}^{-7}$ , 此式对处于主序演化阶段的单星和双星都适用。(3) 恒星年龄的影响。红矮星质径关系难题的研究中, 使用的恒星演化模型来自于 Chabrier<sup>[8, 71, 78]</sup> 和 Baraffe<sup>[82]</sup>, 对恒星年龄的数值大多都设定在 1 Ga, 其实红矮星会延长其活动时间至 10 Ga 甚至以上。在拟合所用模型中, Çakirli 等人<sup>[30]</sup>采用 ZAMS 模型, Neffs 等人<sup>[31]</sup>采用 PMS (pre-main sequence) 模型, 其他大多采用 MS 模型。此外, 恒星的年龄与其金属丰度密切相关, 研究中多采用贫金属丰度或者类太阳金属丰度值。在红矮星金属丰度影响不明的情况下, 恒星年龄依然值得关注。(4) 全对流恒星质量界限。多数研究者认为恒星全对流临界值约为  $0.35 M_{\odot}$ , 但是 Mullan 和 MacDonald<sup>[63]</sup> 研究后发现, 强磁场可以改变恒星的全对流质量界限: 他们的计算结果表明, 新的全对流临界质量可以低至  $0.1 \sim 0.2 M_{\odot}$ 。(5) 恒星内部磁场与对流。恒星内部磁场和对流之间的相互作用目前还不是很清楚, 我们所知道的仅限于对流和较差自转可以产生磁场, 反过来对流会受到磁场的作用力。(6) 混合长参数  $\alpha$  和黑子覆盖因子  $\beta$ 。在质径关系难题的研究过程中, 为了简化模型, 研究者仅用经典混合长参数  $\alpha$  来描述对流的性质, 这显然是不够的, 但由此引起的误差我们并没有估计。另外, 黑子覆盖因子  $\beta$  是用来描述黑子性质的, 黑子不仅有大小, 还有温度, 而且还会随时间变化。但在研究过程中,  $\beta$  取值也比较简单 ( $\beta = \frac{S_{\text{spot}}}{S}$ , 或者  $\beta = \frac{S_{\text{spot}}}{S} \left[ 1 - \left( \frac{T_{\text{eff-spot}}}{T_{\text{eff}}} \right)^4 \right]$ )。

要解决红矮星双星的质径关系难题, 大量的样本、高精度的测量数据首当其冲。近年来的巡天项目如 TrES (Trans-atlantic Exoplanet Survey), DENIS (Deep Near-Infrared Survey), SDSS (Sloan Digital Sky Survey), 2MASS (Two Micron All Sky Survey) 以及 NSVS (Northern Sky Variability Survey) 为我们研究红矮星提供了大量的样本。双星质量和半径的高精度测量, 需要结合测光和分光研究。通过测光可以获得双星的光变曲线, 而分光可以获得双星的视向速度。因为视向速度是轨道倾角的函数, 而我们通过对光变曲线的 WD 解轨正好可以求得双星的轨道倾角, 这样就可以计算出双星的质量和半径。在此, 对 WD 解轨程序做一简单介绍。WD 解轨程序是由 Wilson 等人<sup>[88-92]</sup> 所研发, 能够同时分析光变曲线和视向速度曲线。此外, WD 解轨程序还在进一步发展中, 程序的未来改进预期包括: 支持延展大气掩食, 进一步强化谱线轮廓分析, 强化星周云的计算, 支持偏振分析, 支持脉动分析, 支持周期的不连续变化分析<sup>[93]</sup>; 其次, 小质量恒星结构的深层次解析以及理论演化模型

的完善。对于小质量恒星内部结构,尤其对流包层的分布和性质的研究,还需要提高。同时还要优化和改进小质量恒星大气模型,可参阅参考文献 [94–97]。最后,关于红矮星磁场性质的研究。目前红矮星磁场研究是基于发电机原理<sup>[59]</sup>,磁场对恒星结构的影响还需要更加深入详细的研究。我们相信,随着红矮星双星研究样本数量的增多,探测和研究技术的进步,恒星演化理论的日趋成熟和完善,红矮星双星的质径关系谜题终将会解开。

#### 参考文献:

- [1] Qian S B, Zhang J, Zhu L Y, et al. MNRAS, 2012, 423: 3646
- [2] Liao W P, Qian S B. MNRAS, 2010, 405: 1930
- [3] Torres G, Ribas I. ApJ, 2002, 567: 1140
- [4] Metcalfe T S, Mathieu R D, Latham D W, et al. ApJ, 1996, 456: 356
- [5] Ribas I. A&A, 2003, 398: 239
- [6] Morales J C, Ribas I, Jordi C. A&A, 2008, 478: 507
- [7] Morales J C, Ribas I, Jordi C, et al. ApJ, 2009, 691: 1400
- [8] Chabrier G, Baraffe I. ARA&A, 2000, 38: 337
- [9] Hoxie D T. ApJ, 1970, 161: 1083
- [10] Hoxie D T. A&A, 1973, 26: 437
- [11] Lacy C H. ApJ, 1977, 218: 444
- [12] Popper D M. AJ, 1997, 114: 1195
- [13] Clausen J V, Baraffe I, Claret A, et al. ASPC, 1999, 173: 265
- [14] Ribas I. APSS, 2006, 304: 89
- [15] Clausen J V, Bruntt H, Claret A, et al. A&A, 2009, 502: 253
- [16] Stassun K G, Kratter K M, Scholz A, et al. ApJ, 2012, 756: 47
- [17] Ribas I. ASPC, 2006, 347: 55
- [18] Delfosse X, Forveille T, Ségransan D, et al. A&A, 2000, 364: 217
- [19] Andersen J. A&ARv, 1991, 3: 91
- [20] Berger D H, Gies D R, McAlister H A, et al. ApJ, 2006, 644: 475
- [21] Ségransan D, Kervella P, Forveille T, et al. A&A, 2003, 397: 5
- [22] 谭徽松, 潘开科, 汪洵浩. 天文学进展, 1994, 12: 1
- [23] Pont F, Bouchy F, Melo C, et al. A&A, 2005, 438: 1123
- [24] Bouchy F, Pont F, Melo C, et al. A&A, 2005, 431: 1105
- [25] Pont F, Moutou C, Bouchy F, et al. A&A, 2006, 447: 1035
- [26] Lane B F, Boden A F, Kulkarni S R. ApJ, 2001, 551: 81
- [27] Beatty T G, Fernández J M, Latham D W, et al. ApJ, 2007, 663: 573
- [28] Fernandez J M, Latham D W, Torres G, et al. ApJ, 2009, 701: 764
- [29] López-Morales M, Ribas I. ApJ, 2005, 631: 1120
- [30] Çakirli Ö, Ibañoğlu C, Dervisoglu A. RMxAA, 2010, 46: 363
- [31] Nefs S V, Birkby J L, Snellen I A G, et al. MNRAS, 2013, 431: 3240
- [32] Creevey O L, Benedict G F, Brown T M, et al. ApJ, 2005, 625: 127
- [33] Bayless A J, Orosz J A. ApJ, 2006, 651: 1155
- [34] Young T B, Hidas M G, Webb J K, et al. MNRAS, 2006, 370: 1529
- [35] Çakirli Ö, Ibañoğlu C. MNRAS, 2010, 401: 1141
- [36] Çakirli Ö, Ibañoğlu C. NewA, 2009, 14: 496
- [37] Devor J, Charbonneau D, Torres G, et al. ApJ, 2008, 687: 1253

- [38] Becker A C, Agol E, Silvestri N M, et al. MNRAS, 2008, 386: 416
- [39] Irwin J, Charbonneau D, Berta Z K, et al. ApJ, 2009, 701: 1436
- [40] Blake C H, Torres G, Bloom J S, et al. ApJ, 2008, 684: 635
- [41] Shkolnik E, Liu M C, Reid I, et al. ApJ, 2008, 682: 1248
- [42] Delfosse X, Forveille T, Mayor M, et al. A&A, 1999, 341: 63
- [43] Hebb Leslie, Wyse R F G, Gilmore G, et al. AJ, 2006, 131: 555
- [44] Dimitrov D P, Kjurkchieva D P. MNRAS, 2010, 406: 2559
- [45] Morales J C, Torres G, Marschall L A, et al. ApJ, 2009, 707: 671
- [46] López-Morales M, Shaw J S. ASPC, 2007, 362: 26
- [47] Maceroni C, Montalbán J. A&A, 2004, 426: 577
- [48] Vida K, Oláh K, Kóvári Z, et al. A&A, 2009, 504: 1021
- [49] Hełminiak K G, Konacki M, Różyczka M, et al. MNRAS, 2012, 425: 1245
- [50] Vaccaro T R, Rudkin M, Kawka A, et al. ApJ, 2007, 661: 1112
- [51] Irwin J M, Quinn S N, Berta Z K, et al. ApJ, 2011, 742: 123
- [52] Hartman J D, Bakos G, Noyes R W, et al. AJ, 2011, 141: 166
- [53] Birkby J, Nefs B, Hodgkin S, et al. MNRAS, 2012, 426: 1507
- [54] Irwin J, Aigrain S, Hodgkin S, et al. MNRAS, 2007, 380: 541
- [55] Carter J A, Fabrycky D C, Ragozzine D, et al. Science, 2011, 331: 562
- [56] Kraus A L, Tucker R A, Thompson M I, et al. ApJ, 2011, 728: 48
- [57] Davenport J R A, Becker A C, West A A, et al. ApJ, 2013, 764: 62
- [58] Huélamo N, Vaz L P R, Torres C A O, et al. A&A, 2009, 503: 873
- [59] Durney B R, Robinson R D. ApJ, 1982, 253: 290
- [60] 袁金照. 博士学位论文, 昆明: 中国科学院云南天文台, 2008
- [61] Yuan J Z, Qian S B. ApJ, 2007, 669: 93
- [62] Strassmeier K G, Hall D S, Fekel F C, et al. A&AS, 1993, 100: 173
- [63] Mullan D J, MacDonald J. ApJ, 2001, 559: 353
- [64] Pizzolato N, Maggio A, Micela G, et al. A&A, 2003, 397: 147
- [65] Saar S H. ASPC, 2001, 223: 292
- [66] Hall D S. MmSAI, 1994, 65: 73
- [67] Hall D S, Henry G W. IAPPP, 1994, 55: 51
- [68] Joy A H, Abt H A. ApJS, 1974, 28: 1
- [69] Szecsenyi-Nagy G. IAUS, 1990, 139: 107
- [70] Shore S N, Hall D S. IAUS, 1980, 88: 389
- [71] Chabrier G, Gallardo J, Baraffe I. A&A, 2007, 472: 17
- [72] Morales J C, Gallardo J, Ribas I, et al. ApJ, 2010, 718: 502
- [73] Sackmann I J. A&A, 1970, 8: 76
- [74] Shkolnik E L, Hebb L, Liu M C, et al. ApJ, 2010, 716: 1522
- [75] Torres G. AN, 2013, 334: 4
- [76] Hawley S L, Gizis J E, Reid I N. AJ, 1996, 112: 2799
- [77] Zhang K, Jones C A. GeoRL, 1997, 24: 2869
- [78] Chabrier G, Baraffe I. A&A, 1997, 327: 1039
- [79] Siess L, Forestini M, Dougados C. A&A, 1997, 324: 556
- [80] Leggett S K, Allard F, Dahn C, et al. ApJ, 2000, 535: 965
- [81] López-Morales M. ApJ, 2007, 660: 732
- [82] Baraffe I, Chabrier G, Allard F, et al. A&A, 1997,327: 1054
- [83] Baraffe I, Chabrier G, Allard F, et al. A&A, 1998, 337: 403
- [84] Torres G, Lacy C H, Marschall L A, et al. ApJ, 2006, 640: 1018
- [85] Mullan D J, MacDonald J. ApJ, 2001, 559: 353
- [86] López-Morales M. Nature, 2007, 660: 732

- [87] Strassmeier K G, Weber M, Granzer T, et al. AN, 2012, 333: 663  
[88] Wilson R E, Devinney E J. ApJ, 1971, 166: 605  
[89] Wilson R E. ApJ, 1979, 234: 1054  
[90] Wilson R E. ApJ, 1990, 356: 613  
[91] Van H W, Wilson R E. ApJ, 2007, 661: 1129  
[92] Wilson R E. ApJ, 2008, 672: 575  
[93] 张嘉. 博士学位论文, 昆明: 中国科学院云南天文台, 2013  
[94] Mihalas D. ApJS, 1965, 11: 184  
[95] Gustafsson G, Bell R A, Eriksson K, et al. A&A, 1975, 42: 407  
[96] Kurucz R L. ApJS, 1979, 40: 1  
[97] Kurucz R L. IAUCB, 1993, 21: 93

## The Problem of Relationship Between Mass and Radius of the Red Dwarf Binaries

ZHANG Bin<sup>1,2</sup>, ZHU Li-ying<sup>1,2</sup>

(1. Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Red dwarfs which are ubiquitous in our galaxy refer to, the mass is less than 0.8 solar mass, with a low the surface effective temperature distribution between 2500~5000 K and in their main sequence evolution stage. Generally speaking, red dwarf binaries are cool stars including M and late K type stars, which belong to a part of late low-mass eclipsing binaries. Due to many unique properties, red dwarf binaries are brought into sharp focus in astronomy in recent years. The most prominent properties are the accurate measurement of stellar radius and mass; strongly activity and the discrepancy between theory evolution model and observation because of mass-radius relation problem. The so-called mass-radius relation problem means that the observed stellar radius is bigger than the theoretical calculation and the effective temperature is lower than the theoretical calculation, but the luminosity is consistent. The stellar metallicity, stellar rotation and stellar magnetic activity are three possible main explanations to this problem. As the deepening of the research, the evidence of supporting the combined action of rotation and magnetic activity is gradually increasing, the understanding of the specific details still need more efforts in the future.

**Key words:** red dwarf; eclipsing binary;  $M-R$  relation; magnetic field; rotation; metallicity