

post-AGB 星的演化特征

俞志尧

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

提 要

本文评述了低质量、低光度的 post-AGB 星的演化特征。post-AGB 星是介于 AGB 相与 PN 相之间的特殊天体。在大多数 post-AGB 星的拱星包层中存在着大量尘埃, 从它的辐射频谱中可以观测到强的过量的红外辐射。尘埃是由两个壳层组成的。冷的尘埃壳层分布在拱星包层的外层, 它是由恒星在 AGB 相时质量损失所形成的。热的尘埃壳层分布在拱星包层的靠恒星很近的地方, 它是在 post-AGB 中新近形成的。在 post-AGB 星的拱星包层中还存在着许多分子, 例如 CO 分子, OH、H₂O 和 SiO 脉泽分子。它们在许多波段产生值得引起注意的射电辐射。post-AGB 星常常表现为光度不变、表面温度大大增加的演化特征。

一、引 言

当中、小质量的恒星结束 AGB (Asymptotic Giant Branch) 相向 PN (Planetary Nebula) 相过渡时常常表现为光度不变, 其表面温度大大增加的演化特征。低质量、低光度的 post-AGB 星正处在 AGB 相和 PN 相之间的重要过渡阶段^[1]。

对于 post-AGB 星演化的研究有利于我们了解恒星是如何从 AGB 相演化到 PN 相, 这对于理解 PN 的起源和演化有着重要意义。而 PN 本身是一个天然实验室, 在那里可以成功地研究发生在星际介质中的特殊物理过程。post-AGB 星本身也有着许多奇特的物理性质, 在它的拱星包层中发生着许多复杂的物理现象。因此, 关于 post-AGB 星的演化特征的研究, 一直引起人们的兴趣和注意。

要非常明确地区分 AGB 相与 post-AGB 相及 post-AGB 相与 PN 相之间的界限是很困难的。一般认为当 post-AGB 星的表面温度大大增加, 以至于完全电离了它们的拱星包层时, 恒星就从 post-AGB 相进入 PN 相(一般先进入 proto-PN)^[2]。当恒星离开 AGB 相进入 post-AGB 相时, 一个可能的明显标志是它的质量损失率急剧减少, 就像 Bedijn (1987) 所述, 包围在恒星的碳氧核外面的富氧包层的质量变得极小, 以至于脉动振幅急剧减小, 甚至于停止^[3]。当从 AGB 相过渡到 post-AGB 相时, 恒星已经抛射了大量质量(差不多等于整个拱星包层质量), 拱星包层继续外流, 并且质量损失率将急剧下降, 恒星的表面温度将大大增加。

1992年4月17日收到。

1992年9月9日收到修改稿。

中国科学院天文委员会支持项目。

由于在大多数 post-AGB 星的拱星包层中存在着大量尘埃, 因此在它的辐射频谱中可以发现有很强的红外成分, 即存在着过量的红外辐射^[4]。这种过量的红外辐射, 是由新近的质量损失所形成的热尘埃($T \approx 1000\text{K}$)或者是由以前在 AGB 相所形成的冷尘埃($T \approx 200\text{K}$)产生的。在大多数 post-AGB 星的拱星包层中还存在着大量的气体, 主要有 CO 分子, OH、H₂O 和 SiO 脉泽分子等, 它们在许多波段上产生值得注意的射电辐射^[5-7]。

post-AGB 星一般常有星族 II 的化学组成, 通常的结构是: 中央是一个很小的碳氧核, 包围在外面的是延伸范围很广的大气。由于中央的碳氧核的质量较小, 因此 post-AGB 星的有效万有引力一般比较低。

Kwok 把恒星从 AGB 相至 PN 相(包括 proto-PN 和年轻的 PN)之间的演化简单地归结为表 1 所示^[41]。

表 1 恒星从 AGB 相至 PN 相之间的演化

演化相	例子	光学图	周期 (d)	色温 (K)
AGB	Mira 变星	明 亮	300—600	>300
晚-AGB	OH/IR 星	无光学对应体	600—2000	200—300
post-AGB	19454+2920	无光学对应体	50—150	150—250
proto-PN	18095+2704	有光学对应体	<100	150—250
年轻的 PN	Vy2—2	明 亮	无变化	100—200
PN	许 多	明 亮	无变化	<100

近年来对于 post-AGB 星的演化的研究是很活跃的, 但是观测方面偏重于红外波段, 缺乏系统的射电观测和长期的监测, 特别是在利用多种分子的射电谱线和开展高分辨率观测上。在理论研究上有待于深入研究 post-AGB 星的质量损失机制, 提出新的动力学模型来解释 post-AGB 星在停止质量损失后再出现的第二次质量损失现象。

本文将评述 post-AGB 星的观测特征和演化性质。

二、post-AGB 星的候选标准之一

1. HR4049 和 HD213985

HR4049 和 HD213985 可能是两颗最主要的 post-AGB 星, 这里我们将着重加以阐述。

(1) HR4049

恒星 HR4049 (= HD89353, $\alpha_{1950} = 10^{\text{h}}15^{\text{m}}50^{\text{s}}$, $\delta_{1950} = -28^{\circ}44'33''$) 被定义为 B9.5I_v-II 超巨星^[8,9], 它的幅频谱表现为有过量的红外辐射, 但缺少紫外辐射。HR 4049 是具有初始质量为 $1M_{\odot}$ 的星族 II 的恒星, 其有效温度约为 7500K 。

从 HR4049 的能量分布曲线可以看出, 它有非常过量的红外辐射, 并可用 $T = 1250\text{K}$ 的黑体辐射来拟合, 它的峰约在 $3\mu\text{m}$ 处。此外, 还可发现存在 $T = 30\text{K}$ 的冷的拱星尘埃辐射的证据, 它的峰值在 $100\mu\text{m}$ 处。冷尘埃的延伸范围是很广的, 可达 $15'$ 。若这颗恒星的距离为 400pc , 则冷尘埃的延伸范围可达 1pc ^[10]。

(2) HD213985

HD213985 ($\alpha_{1950} = 22^{\text{h}}32^{\text{m}}46.0^{\text{s}}$, $\delta_{1950} = -17^{\circ}30'59''$) 的等级为 A₂Ia 超巨星, 有非常高

的银纬 ($|b| = 57^\circ$)^[11]。从 HD213985 的能量分布曲线看出, 它的过量的红外辐射是由两种成分组成, 即由具有温度 $T = 1250\text{K}$ 和 $T = 350\text{K}$ 的黑体辐射组成。因此, 包围这种星的拱星包层尘埃也是由两种成分组成的(热的和冷的尘埃)。在紫外辐射部分, 这颗星在 $\approx 400 \text{ \AA}$ 处有一非常陡的吸收^[11,12]。

2. post-AGB 星的候选标准之一

根据上述两颗 post-AGB 星的主要特征我们来候选其他 post-AGB 星, 候选的标准可简单归纳为: (1) 恒星是超巨星, (2) 恒星位于高银纬处, (3) 恒星有强的过量的红外辐

表 2 被候选的样本

HD	SAO	HR	名 称	谱 型	R. A. (1950)			Dec (1950)		
					h	m	s	°	'	"
-	-	-	RV Tau	G2 Iae	04	44	01.9	+26	05	26
30353	39773	-	KS Per	A5 IIIp	04	45	19.9	+43	11	19
-	195996	-	RV Col	G8 I	05	33	50.0	-30	51	26
46703	25845	-	-	F I	06	33	49.4	+53	33	38
62623	174400	2996	3 Pup	A2 Iate	07	41	47.9	-28	50	02
89353	178644	4049	-	E9.5 Ib	10	15	50	-28	44	31
101584	239288	-	-	F0 Iape	11	38	33.6	-55	17	46
104901B	251722	-	Hen 747	F0 Ib	12	02	13.0	-61	43	25
112374	181244	4912	LN Hya	F3 Ia	12	53	48.4	-26	11	22
119608	158132	-	-	B1 Ib	13	41	48.2	-17	41	09
137569	101555	-	-	E5 III	15	24	00.8	+14	52	04
141527	84015	5880	R CrB	G0 Iep	15	46	30.6	+28	18	31
-	65425	-	UU Her	F5 Ib	16	34	12.2	+38	04	05
161796	30548	-	-	F3 Ib	17	43	41.3	+50	03	47
163506	85545	6685	89 Her	F2 Ia	17	53	24.0	+26	03	23
172324	67189	-	-	A0 Iab	18	36	15.4	+37	23	24
-	-	-	V 348 Sgr	WC 10	18	37	18.3	-22	57	29
-	-	-	MV Sgr	B	18	41	33	-21	00	24
177300	245923	-	BL Tel	F8I	19	02	43.9	-51	29	41
180093	211117	7296	RY Sgr	G0 Ipe	19	13	16.9	-33	36	39
181615	162518	7342	v Sgr	A2 Ia	19	18	51.7	-16	03	01
190390	163245	7671	-	F1 III	20	02	19.8	-11	44	32
213985	165175	-	-	E9 I	22	32	46.0	-17	30	59
214080	165181	-	-	B1 Ib	22	33	25.3	-16	38	48
224014	35879	9045	p Cas	F8 Iap	23	51	52.4	+57	13	16

射。

根据上述候选标准选择 25 个样本, 列于表 2 中^[4]。

三、post-AGB 星的红外辐射

1. 色-色图

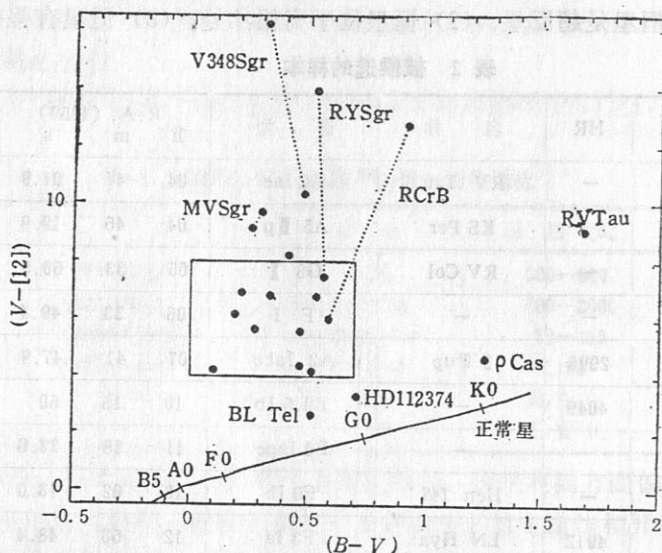


图 1 $B-V \rightarrow V-[12]$ 色-色图。 $V-[12]$ 色指数突出表示了冷尘埃的存在 ($T \approx 300\text{K}$)。所画的实线代表了正常星的颜色。对于 RCrB 型变星 RCrB, V348 Sgr, MV Sgr 和 RY Sgr 给出了最大和最小两个点。方框表示在其中包含了最大多数的 post-AGB 星的候选样本

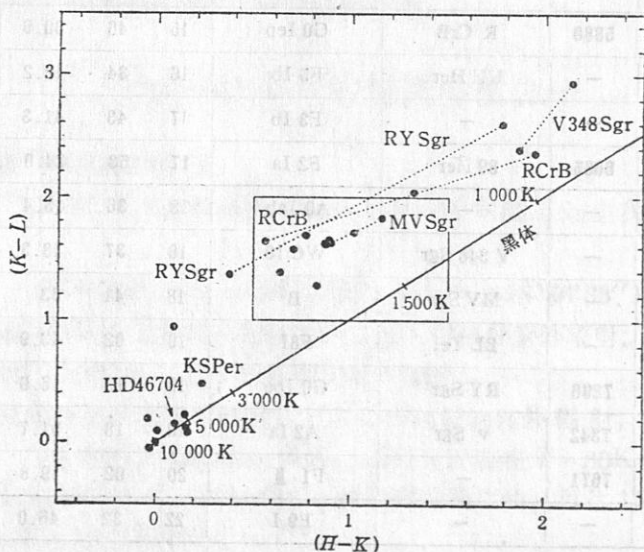


图 2 $H-K \rightarrow K-L$ 色-色图。 $K-L$ 色指数突出表示了热尘埃的存在 ($T \approx 1000\text{K}$)。所画的直线代表了黑体的色。对于 RCrB 型变星 RCrB, V348 Sgr, MV Sgr 和 RY Sgr 给出了最大和最小两个点。方框表示在其中包含了最大多数的 post-AGB 星的候选样本

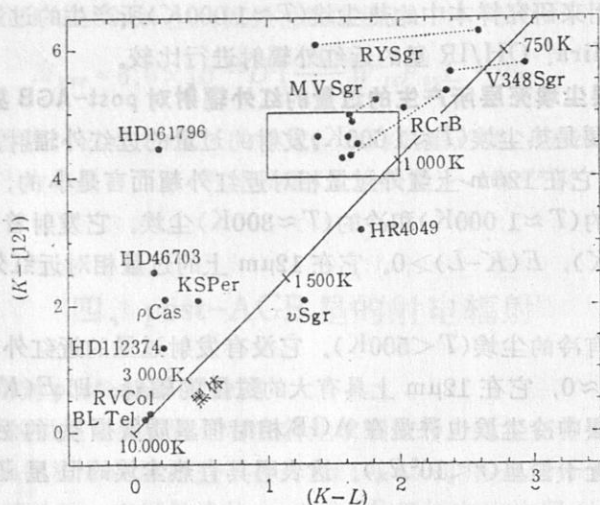


图 3 $K-L \rightarrow K-[12]$ 色-色图。所画的直线代表了黑体的色。对 R CrB 型变星 R CrB, V348 Sgr, MV Sgr 和 RY Sgr 给出了最大和最小两个点。方框表示在其中包含了最大多数的 post-AGB 星的候选样本

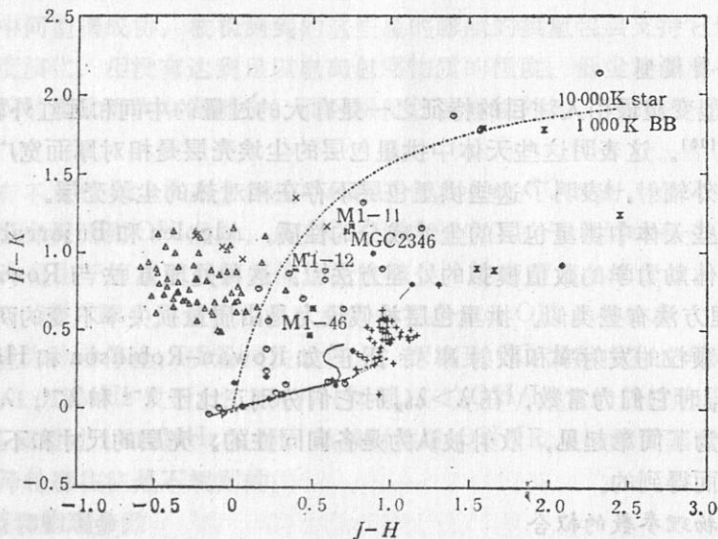


图 4 $J-H \rightarrow H-K$ 色-色图。所画实线表示了主序星的色, 带点的虚线表示了巨星的色, 带划的虚线表示了超巨星的色, 带点划虚线表示了具有不同壳半径的温度为 1000K 尘埃壳层的恒星 (恒星温度为 10000K) 的色图。图中的符号说明: \circ 代表样本星, $+$ 代表 Mira 变星, \times 代表 OH/IR 星, Δ 代表 PN(N-型), \times 代表 PN(N+(D)型), \diamond 代表 PN(N+(S)型), $*$ 代表 PN(S+(D)型), \star 代表 PN(Pec型)。

为了研究 post-AGB 星的过量的红外辐射特征, 在这里给出以下四个色-色图^[4] (见图 1-4)。

$B-V \rightarrow V-[12]$ 图用来研究过量的红外辐射, 并与光学波长范围辐射进行比较。

$H-K \rightarrow K-L$ 图用来研究由于热尘埃 ($T \approx 1000\text{K}$) 产生的过量的近红外辐射。

$K-L \rightarrow K-[12]$ 图用来研究由于冷尘埃 ($T \approx 250\text{K}$) 产生的过量的远红外辐射与热尘埃 ($T \approx 1000\text{K}$) 所产生的过量的近红外辐射的比较。

$J-H \rightarrow H-K$ 图用来研究样本中的热尘埃 ($T \approx 1000\text{K}$) 所产生的过量的近红外辐射, 并与其他天体如 PN、Mira、OH/IR 星的近红外辐射进行比较。

2. 利用拱星包层尘埃壳层所产生的过量的红外辐射对 post-AGB 星进行分类:

(1) 恒星具有主要是热尘埃 ($T \approx 1000\text{K}$) 发射的过量的近红外辐射, 即 $E(J-H)$, $E(H-K)$, $E(K-L) > 0$ 。它在 $12\mu\text{m}$ 上红外过量相对近红外超而言是小的, 即 $E(K-[12]) < 4$ 。

(2) 恒星具有热的 ($T \approx 1000\text{K}$) 和冷的 ($T \approx 300\text{K}$) 尘埃, 它发射着过量的近红外辐射, 即 $E(J-H)$, $E(H-K)$, $E(K-L) > 0$ 。它在 $12\mu\text{m}$ 上的过量相对近红外超而言是大的, 即 $E(K-[12]) > 4$ 。

(3) 恒星主要具有冷的尘埃 ($T < 500\text{K}$)。它没有发射过量的近红外辐射, 即 $E(J-H)$, $E(H-K)$, $E(K-L) \approx 0$, 它在 $12\mu\text{m}$ 上具有大的过量的辐射, 即 $E(K-[12]) > 0$ 。

观测到的拱星包层中冷尘埃也许是在 AGB 相时恒星质量损失的残余。热尘埃是新近形成的, 并且非常接近于恒星 ($r < 10^2 R_*$)。这表明具有热尘埃的恒星还在失去它们的质量^[14]。

3. RV Tauri 型变星的尘埃辐射

RV Tauri 型变星是恒星处在 post-AGB 相的第一步, 因此我们将仔细地阐述其尘埃辐射特性。

(1) 尘埃辐射模型

RV Tauri 型变星最引人注目的特征之一是有大的过量的中间和远红外辐射, 但在近红外的辐射却很少^[15]。这表明这些天体中拱星包层的尘埃壳层是相对厚而宽广的。在 $1-5\mu\text{m}$ 上缺乏过量的红外辐射, 表明了这些拱星包层不存在相对热的尘埃壳层。

为了研究这些天体中拱星包层的尘埃成分的性质, Alcolea 和 Bujarrabal 发展了对辐射转移和尘埃流体动力学的数值模拟的处理方法^[1]。这种处理方法与 Rowan-Robinson 和 Harris^[16]的处理方法有些类似。拱星包层被假设是由质量损失率不变的两个邻近的壳层所组成。尘埃和颗粒的发射率和散射率特征正如 Rowan-Robinson 和 Harris 的理论所述^[16], 在 $\lambda < \lambda_{op}$ 时它们为常数, 在 $\lambda > \lambda_{op}$ 时它们分别正比于 λ^{-1} 和 λ^{-4} , λ_{op} 的值与尘埃颗粒的尺度有关。为了简单起见, 散射被认为是各向同性的。壳层的尺寸和不透明度是由观测且结合模型处理而得到的。

(2) 观测和物理参数的拟合

拱星包层的尘埃质量可以从 IRAS F_{60} 流量来估计^[17]

$$M_{\pm} = 1.7 \times 10^{-6} D^2 F_{60} \left(\frac{B(T, 60\mu\text{m})}{B(100\text{K}, 60\mu\text{m})} \cdot \frac{k(60)}{150} \right)^{-1}$$

这里 M_{\pm} 为尘埃质量, 以 M_{\odot} 为单位; D 为距离, 以 kpc 为单位; F_{60} 为在 $60\mu\text{m}$ 上的流量, 以 Jy 为单位; K 为尘埃发射系数, 以 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 为单位; B 为 planck 函数。取 $k=150$, 则可简化为

$$M_{\pm} = 1.7 \times 10^{-7} D^2 F_{60} [\exp(239.8/T) - 1]$$

根据上式, 当平均尘埃温度由 F_{25}/F_{60} 之比来估计时, 尘埃质量可以由 F_{60} 和平均尘埃温度得到。一般来说, 拱星包层尘埃质量约为 $0.01 M_{\odot}$ 。

尘埃质量损失率可以从 $60\mu\text{m}$ 上的流量密度来估计

$$\dot{M}_{F60} = 6.6 \times 10^{-12} D^2 \left(\frac{240}{k} \right) V_{16} F_{60} L^{-0.47} \mu$$

k 为尘埃的光学厚度, 以 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 为单位; L 为恒星光度, 以 $10^4 L_{\odot}$ 为单位; V_{16} 是膨胀速度, 以 $15 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 为单位; 当 μ (气体质量/尘埃质量) ~ 160 ^[18] 时, 便能得到尘埃质量损失率 \dot{M}_{F60} 。

四、post-AGB 星的射电辐射

1. 利用射电辐射对 post-AGB 星分类

在 post-AGB 星的拱星包层中除了存在着尘埃颗粒外, 还存在着大量的气体分子, 主要有 CO 分子, OH、 H_2O 和 SiO 脉泽分子等。我们可以利用这些分子的射电观测来研究其拱星包层的结构和物理性质。根据候选的 post-AGB 星样本的共同的射电特征, 我们把 post-AGB 星候选样本分为三类:

(1) 恒星具有中间型谱和膨胀的分子壳

多数天体与中间型谱成协, 被检测到的这些星的膨胀的拱星包层支持它们在 AGB 相向高的恒星表面温度演化, 但没有达到足以电离包层物质的程度。低尘埃温度和在可见光波段的中央星探测表明其质量损失率在减少, 而且拱星包层继续外流, 只保留一点物质在恒星附近。

(2) 恒星具有不变的 IRAS 流量和从冷的拱星包层来的 CO 发射, 但没有 OH 发射

一些冷的星没有探测到 OH 发射, 从 CO 探测中证实了分子包层的存在。富氧星没有探测到 OH 脉泽也许是由于恒星质量损失停止而使得 OH 柱密度太小的缘故。

(3) 非脉动的 OH/IR 星, 它有光学对应体或有异常的 OH 发射轮廓

这类恒星表现为脉动停止, 质量损失也停止。探测到 CO 发射中有光学对应体, 典型的 OH/IR 星有强的 1612MHz 发射(比 1667MHz 强)。在 OH/IR 星的最后阶段, 它的 1667MHz 发射增加, 甚至超过 1612MHz 发射。从球对称的 OH/IR 星过渡到非球对称的 PN, 恒星发射的 OH 脉泽轮廓往往是不规则的。

2. 消光模型和物理参数

为了分析在 RV Tauri 星中的分子资料和建立对于红外发射起着明显作用的物理条件, Alcolta 和 Bujarrabal 计算了拟合相应的尘埃发射所得到的包层的 CO 强度^[11]。在他们的计算中, 利用标准 LVG 模型计算了分子消光^[19], 对膨胀速度和局部扰动速度的严格的转移方程求解, 得到了谱线轮廓。Bujarrabal et al^[20], 分析了从 R Sct 来的 CO 发射, 他们假设的内层半径 $R_i \sim 2 \times 10^{16} \text{cm}$ 、外层半径 $R_o \sim 8 \times 10^{16} \text{cm}$ 、 $\dot{M} \sim 4 \times 10^{-7} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、相对丰度 $[\text{CO}]/[\text{H}_2] \sim 10^{-4}$ 等, 从观测结果能够得到解释。

3. 分子在拱星包层中的分布

观测表明, CO 分子和 OH 脉泽分子分布在 post-AGB 星的拱星包层的外壳层, 而 SiO、 H_2O 脉泽分子分布在其拱星包层的内壳层。

SiO 脉泽辐射也许来自那些内壳层, 对那些区域的范围和物理条件实际上还不大清楚^[16]。现在关于 SiO 的观测资料还不足以研究这样复杂的区域。目前观测到的 SiO 强度对于具有球半径为 5×10^{14} cm, 气体温度为 1000 K, 光学厚的已被热化的 SiO 发射来说是合适的。从 R Sct 来的 SiO 发射的检测结果表明, 这颗恒星正以相对低的质量损失率继续喷射物质。

H₂O 脉泽辐射仅在极少数 post-AGB 星的候选样本中被观测到。这种现象或许可由以下两个方面的原因之一来解释: (1) 拱星包层的内壳层太厚, 以致于 H₂O 脉泽被熄灭了, (2) 靠近恒星只有一点物质, 以致于缺乏足够热和密的气体来支持 22 GHz H₂O 脉泽。看来第(2)条理由比较适合于 post-AGB 星^[7]。

OH 脉泽辐射的谱线轮廓是很异常的, 有的表现为双峰结构, 有的没有双峰结构。有的 OH1612MHz 脉泽的谱线轮廓为单峰, 有的 OH1667MHz 脉泽谱线轮廓为三峰。这种 OH 脉泽辐射的异常谱线轮廓还不能得到满意的解释, 可能跟 post-AGB 星的拱星包层外壳层的运动状况有关^[7]。

CO 分子辐射的观测将有助于证认它们的性质。被探测到的 CO 分子宽发射线往往与 post-AGB 星的拱星包层外壳层成协, 而 CO 分子狭发射线往往来自类似于冷的拱星包层的云源^[21-23]。

俞在分析和解释 Mira 变星拱星包层 CO(2-1)发射线时提出一种新模型—膨胀的多壳模型^[20], 根据 $T_A^*(V_i) - (V_i - V_c)^2$ 图(这里 $T_A^*(V_i)$ 是观测得到的 LSR 速度为 V_i 的 CO(2-1) 分子发射线的天线温度, V_c 为恒星的视向速度, V_i 为 CO(2-1) 分子的 LSR 速度)来划分壳层, 然后分壳层进行统计拟合, 最后得到膨胀的多壳模型。

因为对于球对称的拱星包层, 如果 CO 发射线是光学厚的, 用抛物线来拟合是合适的, 因此可以得到

$$T_A^*(V_i) = T_A^*(\text{峰}) \left[1 - \frac{(V_i - V_c)^2}{V_0^2} \right]$$

这里 $T_A^*(\text{峰})$ 为峰值天线温度; V_0 为膨胀速度, 它应是拱星包层离恒星中心径向距离 r 的函数。对于离恒星中心径向距离为 r 的膨胀速度为 V_0 的壳层来说, $T_A^*(\text{峰})$ 、 V_0 均为不变值。因此 $T_A^*(V_i)$ 与 $(V_i - V_c)^2$ 为单调递减的线性关系。我们可以利用 $T_A^*(V_i) - (V_i - V_c)^2$ 图以及上面的公式: 根据 $T_A^*(V_i) - (V_i - V_c)^2$ 图上点的分布有排列成单调线性递减的区域来划分壳层, 然后分壳层(即分区域)进行统计拟合。这样统计拟合的误差为最小, 最后得到膨胀的多壳模型。这种膨胀的多壳模型, 对于研究 post-AGB 星在初期演化时的拱星包层外壳层的 CO 分子的分布十分有用。

五、低质量的 RV Tauri 型变星和 PPN 的演化

通常认为 post-AGB 星有三种类型, 即在银晕(即高银纬)处发现的 F.K 等谱型的超巨星、非脉动的 OH/IR 星和 RV Tauri 型变星。作为 post-AGB 星的 RV Tauri 型变星在进

入 PN 相时, 一般先演变为 PPN(proto-PN)-89 Her, Red Rectangle 和 M2-9 也许是属于低质量的 PPN^[1](但有的作者认为 M2-9 是一个典型的 PN^[46])。它们的演化特征如下:

1. 包层的膨胀速度

一般说来 RV Tauri 型变星的拱星包层的膨胀速度为 $4-5\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 比 PPN 的膨胀速度 $10-15\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 要低^[1,31]。

2. 低质量的 RV Tauri 型变量和 PPN 的演化

现在从一些低质量 PPN 的观测中, 可以确认出高的恒星温度与晚的演化度之间的单调关系。为了从红外观测来研究包层的演化, 我们将利用在 RV Tauri 型变星中的分析方法, 把它应用到 89Her, Red Rectangle 和 M2-9 中去^[1,32]。

在 89Her, Red Rectangle 和 M2-9 的谱中发现, 在它们的拱星包层中存在着两个发射壳, 模型的计算也证实了这个结果^[33,34]。89Her, Red Rectangle, 以及 M2-9 的外壳层所相应的质量损失率与 RV Tauri 型变星的质量损失率差不多, 但是与 M2-9 外壳层所成协的质量损失率要比 RV Tauri 型变星大一些。89Her, Red Rectangle 和 M2-9 的内壳层的质量损失率以及内壳层与外壳层的质量损失率之比 \dot{M}_2/\dot{M}_1 要比 RV Tauri 型变星大。从它们的观测频谱中可清楚地观测到在短波处有一个强的跳跃。这也许是因为它们是比 RV Tauri 型变星更进一步演化的天体, 并且有着相对高的物质抛射的缘故^[1]。

Red Rectangle 和 M2-9 的外壳层的内半径要比 RV Tauri 型变星的最外的外壳层的内半径大。这也证实了它们是比 RV Tauri 型变星更进一步演化的天体。这些外壳层的形成和运动所需的时间尺度各不相同。对于 89Her 大约是 50 年, 对于 Red Rectangle 大约是 690 年, 对于 M2-9 大约也是 690 年。对于 89Her 来说这个时间尺度相对小些, 表明该恒星在经历了 50 年时间后, 它的恒星温度已经达到 8000K。

post-AGB 星在 RV Tauri 相持续的时间大多数约为 200 年。从 RV Tauri 型变星的红外发射的分析中, 我们得知包围这些天体的拱星包层是在 AGB 相由质量损失抛射而形成的(质量损失率约为 4×10^{-7} 至 $7\times 10^{-6}M_{\odot}\text{yr}^{-1}$)。

89Her, Red Rectangle 和 M2-9 是从 RV Tauri 型变星演化而来的。它们的拱星包层离恒星中心的距离比 RV Tauri 型变星的拱星包层离恒星中心的距离更远, 它们的温度更低, 并且内部热的尘埃壳层占主导地位。

有一类 RV Tauri 型变星, 例如 R Sct, 是很“懒”的。它们不像其他天体在大约 200 年以后离开 RV Tauri 相, 而要在接近 AGB 相处停留较长时间。它们要停留约 2000 年时间才离开 RV Tauri 相^[35,36]。估计以前形成的 RV Tauri 型变星大约有五分之一属于“懒”型演化。

Volk 和 Kwok 作了模型计算, 研究了 PPN 的红外性质的变化^[37,38]。在模型计算中, 他们支持了整个拱星包层是由恒星风所吹散, 而不是由突然的抛射而引起的, 并且拱星物质以不变的速度离开恒星^[39], 同时拱星包层的质量将减少, 而恒星的有效温度将增加^[40]的观点。他们在计算中取恒星光度在 6×10^3 至 $3\times 10^4L_{\odot}$ 之间, 并保持不变, 这个恒星光度的数值相当于核的质量为 $0.6M_{\odot}$ 至 $1M_{\odot}$ 。他们发现拱星包层的尘埃壳层在向外运动过程中, 它的红外辐射的色和谱都变化得很厉害, 这显然与尘埃壳层在拱星包层中向外运动时的温度变

化密切相关。

Schönberner 曾对 PN 的中央星模型作过计算, 他的计算鉴于两点假设: (1) 抛射时间比演化时间及 PN 的寿命短, (2) 抛射过程仅发生在外层, 并且 PN 形成并不影响核的演化^[42]。Harpatz 和 Kovetz 则认为可视边界是一个电离界面, PN 正是在 AGB 相中中央星失去的包层的电离部分^[43]。Kwok 提出两种风模型, 他考虑从热核来的超声速风与在色层中 AGB 相时形成的慢而强致密的风之间相互作用^[44]。Sabbadin et al 分析了在 PN 中的内部运动, 提出了所谓两相模型。他考虑了在离开 AGB 相时拱星包层中壳的突然被抛射现象, 他认为壳在初始时是光学厚的, 但到后来其电离部分则为可见的^[45]。

参 考 文 献

- [1] Alcoloa, J. and Bujarrabal, V., *Astron. Astrophys.*, 245 (1991), 499.
- [2] Likkel, L. et al., *Astron. Astrophys.*, 246 (1991), 153.
- [3] Bedijn, P. J., *Astron. Astrophys.*, 186 (1987), 136.
- [4] Trams, N. R. et al., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 87 (1991), 361.
- [5] Loup, C. et al., *Astron. Astrophys.*, 227 (1990), L29.
- [6] Morris, M., in *Mass Loss From Red Giants*, ed. by M. Morris, B. Zuckerman, p. 129, (1985).
- [7] Likkel, L., *Ap. J.*, 344 (1989), 350.
- [8] Lamers, H. J. G. L. M. et al., *Astron. Astrophys.*, 154 (1986), L20.
- [9] Houk, N. and Cowley, A. P., University of Michigan, Catalogue of Two Dimensional Spectra Types for the HD Stars, (1975).
- [10] Waters, L. B. F. M. et al., *Astron. Astrophys.*, 211 (1989), 208.
- [11] Waelkens, C. et al., *Astron. Astrophys.*, 181 (1987), L5.
- [12] Buss, R. H. et al., *Ap. J.*, 347 (1989), 977.
- [13] Waters, L. B. F. M. et al., *Astron. Astrophys.*, 172 (1987), 225.
- [14] Trams, N. R. et al., *Astron. Astrophys.*, 218 (1989), L1.
- [15] Gehrz, R. D. and Woolf, N. J., *Ap. J. Lett.*, 161 (1970), L213.
- [16] Rowan, Robinson M. and Harris, S., *M. N. R. A. S.*, 200 (1982), 197.
- [17] Gillett, F. C. et al., *Ap. J.*, 300 (1986), 722.
- [18] Knapp, G. R., *Ap. J.*, 293 (1985), 273.
- [19] Bujarrabal, V. et al., *Astron. Astrophys.*, 219 (1989), 256.
- [20] Bujarrabal, V. et al., *Astron. Astrophys.*, 234 (1990), 355.
- [21] Arquilla, R. et al., *M. N. R. A. S.*, 220 (1986), 125.
- [22] Zuckerman, B. and Dyck, H. M., *M. N. R. A. S.*, 220 (1986), 125.
- [23] Zuckerman, B. and Dyck, H. M., *Ap. J.*, 304 (1986), 394.
- [24] Zuckerman, B. and Dyck, H. M., *Ap. J.*, 311 (1986), 345.
- [25] Zuckerman, B. and Dyck, H. M., *Astron. Astrophys.*, 209 (1989), 119.
- [26] Knapp, G. R. et al., *Ap. J.* 336 (1989), 822.
- [27] Leahy, D. A. et al., *Ap. J.*, 320 (1987), 825.
- [28] Olofsson, H. et al., *Astron. Astrophys.*, 196 (1988), L1.
- [29] 俞志尧, 科学通报, 37(1992), 338.
- [30] Schonberner, D., *Ap. J.*, 272 (1983), 708.
- [31] Fix, J. D. and Claussen, M. J. *Ap. J. Lett.*, 287 (1984), L35.
- [32] Bachiller, R. et al., *Astron. Astrophys.*, 196 (1988), L5.
- [33] Eggen, O. J., *A. J.*, 91 (1986), 890.
- [34] Calvet, N. and Cohen, M., *M. N. R. A. S.*, 182 (1978), 687.
- [35] Bujarrabal, V. et al., *Astron. Astrophys.*, 204 (1988), 242.
- [36] Renzini, A., in *IAU Symposium No. 103*, p. 267, (1984).
- [37] Volk, K. M. and Kwok, S., *Ap. J.*, 331 (1988), 435.
- [38] Volk, K. M. and Kwok, S., *Ap. J.*, 342 (1989), 345.
- [39] Kwok, S., *Ap. J.*, 258 (1982), 280.

- [40] Paczynski, B., *Acta Astron.*, 21 (1970), 4.
- [41] Kwok, S., *M. N. R. A. S.*, 244 (1990), 179.
- [42] Schönberner, D., *Astron. Astrophys.*, 103 (1981), 119.
- [43] Harpatz, A. and Kovetz, A., *Astron. Astrophys.*, 95 (1981), 66.
- [44] Kwok, S., in *Mass Outflow From Stars And Galactic Nuclei*, ed. by Gilmozzi, R. et al., p. 123, (1987).
- [45] Sabbadin, F. et al., *Astron. Astrophys.*, 136 (1984), 181.
- [46] Huggins, P. J. and Healy, A. P., *Ap. J.*, 346 (1989), 201.

(责任编辑 林一梅)

The Evolution Characters of Post-AGB Stars

Yu Zhiyao

(Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai 200030)

Abstract

The evolution characters of post-AGB stars are reviewed in this paper. post-AGB stars are special objects, which are located at between AGB phase and PN phase. There is a lot of dust in their circumstellar envelopes. The strong excess infrared radiation is observed from their spectra. Dust consists of two shells. Cold dust-shell is distributed on out-layer of circumstellar envelop. It is formed because of mass loss of the star at AGB phase. Hot dust-shell is distributed in circumstellar envelop nearby the star. It is recently formed at post-AGB phase. There also is a lot of molecules in their circumstellar envelop, for example CO molecules, OH, H₂O, and SiO maser molecules. It is considerable that they radiate radio wave at many quads. The evolution characters of post-AGB stars often appear to be constant luminosity, and great increase of their surface temperature.