

恒星结构与演化理论中几个感兴趣的问题(下)

黄润乾

(中国科学院云南天文台)

提 要

本文介绍了在当前恒星结构与演化理论中两个感兴趣的问题, 恒星振动与大质量星的演化问题。

一、恒星振动

最近十多年来, 恒星振动和太阳振动的研究发展非常迅速。这两个课题的理论部分相同, 因而共同发展成为一个新的研究领域。这个领域之所以引起人们极大的兴趣, 是因为对恒星振动频率的测定以及对频率谱的理论模型分析, 为了解恒星内部结构和动力学性质开辟了一条新途径。

通常可以将恒星的振动分为径向振动和非径向振动。径向振动的恒星, 它内部各物理量可以写成以下形式:

$$\left. \begin{aligned} r_r &= r_0(r) + r_1(r)e^{i\omega t} \\ \rho &= \rho_0(r) + \rho_1(r)e^{i\omega t} \\ P &= P_0(r) + P_1(r)e^{i\omega t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中脚标为“0”的项表示平衡态项, 而脚标为“1”的项为扰动项。扰动项的一般形式为 $A(r)e^{i\omega t}$, 即只与半径 r 和时间 t 有关, 而与方向无关。

通过观测已知的径向振动恒星, 或称径向脉动星有: 造父变星、室女座 W 型星、天琴座 RR 型星、盾牌座 δ 型星、矮造父变星、船帆座 AI 型星等。这些星都有周期的光变和光谱型变化, 有周期的视向速度变化, 还有明显的亮度一周期关系。它们在赫罗图中的分布也很有规律, 集中分布在一条窄长的带内, 称为造父脉动不稳定带。关于径向脉动星的许多观测结果可参看[1—3]。

关于径向脉动星的理论, 早在六十年代就已取得很大进展。理论证明, 一定质量范围的恒星(对造父变星为 $4-14M_{\odot}$; 对天琴座 RR 型星为 $\sim 0.5-0.7M_{\odot}$), 当它们演化到赫罗图中一定区域内, 恒星就会产生动力学非稳定, 恒星的外壳就会膨胀和收缩而成为脉动星。赫

1985年2月6日收到。

1986年11月21日收到修改稿。

罗图中的这个区域正好与观测到的造父脉动不稳定带相吻合, 并且理论计算出来的本征频率与观测到的脉动星频率相符。理论得到的亮度一周期关系, 也与观测相符。理论还证明, 径向振动的恢复力是压力, 振动波是声波, 它只在恒星的外部靠近表面的一定层次内有较大的振幅。对于造父变星、天琴座 RR 型星来说, 引起振动的原因是因为在恒星外壳的一定层次内(主要是氢或氦的部分电离区内), 当发生收缩而使压强升高时, 物质的不透明度 κ 会急剧增大, 物质将比在平衡态时吸收更多的、由内向外穿过这个区域的辐射能量, 从而使这个区域的温度升高, 体积膨胀。反之, 当这个区域体积膨胀而使压强下降时, 物质的不透明度又急剧下降, 因而物质吸收的能量小于在平衡态时吸收的能量, 并造成温度下降, 体积收缩。这样造成了恒星的外壳不断地膨胀和收缩。这样由于不透明度 κ 的变化而引起振动的机制称为 κ -机制。有关径向脉动的理论可参看[4—10]。关于造父变星物理与演化理论新进展可参看[11]。

近年来人们发现绝大多数仙王座 β 型星也是径向振动的脉动星[12],[13], 但它们在赫罗图中的分布不在造父脉动不稳定带内。关于仙王座 β 型星产生脉动不稳定性的原因, 现在还不清楚。Cox 和 Hodson(1982)[14]认为对流核的超射可以引起仙王座 β 型星不稳定。Osaki(1982)[15]总结了各种引起仙王座 β 型星不稳定的假想。

当恒星作非径向振动时, 恒星内部各物理量可完成以下形式:

$$\left. \begin{aligned} r_r &= r_0(r) + r_1(r)Y_l^m(\theta, \phi)e^{i\omega t} \\ \rho &= \rho_0(r) + \rho_1(r)Y_l^m(\theta, \phi)e^{i\omega t} \\ P &= P_0(r) + P_1(r)Y_l^m(\theta, \phi)e^{i\omega t} \\ &\vdots \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

这时扰动项的一般形式为 $A(r)Y_l^m(\theta, \phi)e^{i\omega t}$, 即扰动项与半径 r , 方向 (θ, ϕ) 及时间 t 有关。

当恒星作非径向振动时, 恒星上任意点的位移矢量包含有径向方向的分量和水平方向的分量。对于一个球形对称结构的恒星, 可以证明, 在线性近似下, 其位移矢量 $\vec{\xi}$ 可以写成如下形式:

$$\vec{\xi} = \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{l}, \mathbf{m}} \left(\xi_{\mathbf{l}}^{\mathbf{l}}(r), \xi_{\mathbf{l}}^{\mathbf{l}}(r) \frac{\partial}{\partial \theta}, \xi_{\mathbf{l}}^{\mathbf{l}}(r) \frac{\partial}{\sin \theta \partial \varphi} \right) Y_l^m(\theta, \varphi) e^{i\omega t} \quad (3)$$

式中 $Y_l^m(\theta, \varphi)$ 是球谐函数; σ 为本征频率; $\xi_{\mathbf{l}}^{\mathbf{l}}(r), \xi_{\mathbf{l}}^{\mathbf{l}}(r)$ 为本征函数。非径向振动恒星的性质, 由本征频率和本征函数来描述。本征函数的具体形式可以用三个量 k, l, m 来标记。其中正整数 k 是径向方向的结点数, 即满足

$$\xi_{\mathbf{l}}^{\mathbf{l}}(r_i) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

的结点数(除 $r = 0$ 以外)。我们称 k 为振动模式的阶(order)。正整数 $l(l = 0, 1, 2, \dots)$ 代表球面上的结线数目, 我们称 l 为振动模式的次(degree)。对于一给定的 l 值, m 可以取 $(2l + 1)$ 个可能值($m = 0, \pm 1, \dots, \pm l$), m 代表在 φ 方向的花样重现数。图 1 给出 l, m 取不同值时, 恒星的几种振动情况。可以看到恒星有的部分收缩, 有的部分膨胀的现象。当忽略恒星的自转和磁场的作用时, 恒星的自转和本征振动频率仅与 k 和 l 有关, 而与 m 无关; 当考虑恒星自转和磁场作用时, 本征频率还与 m 有关。

理论证明, 恒星的非径向振动, 可以有几种不同的振动模式: (1) p -模式振动。这时压力

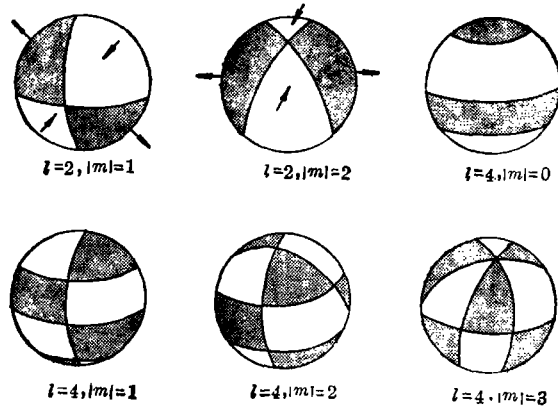


图 1

是主要恢复力, 振动波为声波, 振动主要在径向方向。径向脉动可以看成是 $l=0$ 的 p -模式振动; (2) g -模式振动。这时重力是主要的恢复力, 振动周期实际上总是比 p -模式的振动周期长; (3) f -模式振动。这时重力是主要的恢复力, 振动波实际是表面的重力波, 即在恒星内部径向方向没有节点(中心点除外), $k=0$ 的情况。

非径向振动产生的机制可以有: (1) κ -机制。即由于某个区域内不透明度 κ 的变化而引起振动; (2) ϵ -机制, 即某个区域内产能率 ϵ 的变化可以引起振动; (3) 其他机制, 如某个区域内化学组成的变化、对流原因等引起的振动。

通过观测已知有非径向振动的恒星可举例如下:

1. 太阳振动

Leighton (1960)^[16] 首先发现太阳有周期为 5 分钟的振动。为了证明太阳有 5 分钟振动, 通常需要借助频率波数图 (σ, k_h 图), 或称诊断图。设太阳大气为等温的平行平面结构大气, 则可以证明, 在这个大气中传播的波, 其角频率 σ , 水平波数 k_h 和垂直波数 k_z 之间应满足以下色散关系:

$$c^2 k_z^2 = (\sigma^2 - \sigma_{ac}^2) + c^2 k_h^2 (N^2 - \sigma^2) / \sigma^2 \tag{5}$$

式中 c 为声速, N 为 Brunt-Väisälä 频率 ($N = (g/c) \sqrt{r-1}$, $r = c_p/c_v$), σ_{ac} 为声波截止频率 ($\sigma_{ac} = rg/2c$)。

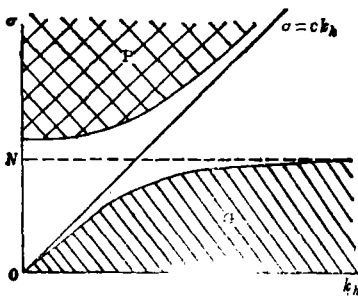


图 2. σ, k_h -图。

当给定 σ 和 k_h 时, 由(5)式可以确定 k_z^2 值。如果 $k_z^2 > 0$, 则波可以在垂直方向传播; 如果 $k_z^2 = 0$, 则在垂直方向不能传播。图 2 为 σ, k_h -图。横轴为 k_h , 纵轴为 σ 。图中可以划分为三个区域: (1) 以“P”标记的, $k_z^2 > 0$ 的区域, 在这个区域内声波可以传播; (2) 以“G”标记的, $k_z^2 > 0$ 的区域, 在这个区域内重力波可以传播; (3) $k_z^2 < 0$ 的区域, 在这个区域内波将被吸收。

太阳大气不是等温的,严格说也不能局部地讨论波的本质。但我们仍然可以借助 σ, k_h -图来说明太阳有 5 分钟的振动。图 3 是 Frazier (1968)[17] 观测得到的太阳的诊断图。图中可以明显看到两个不同的区域:低波数($k_h \sim 1 \text{Mm}^{-1}$)的振动功率具有 5 分钟的周期;而高波数区域($k_h \sim 2-4 \text{Mm}^{-1}$)没有周期的低频振动功率。它和太阳无规的米粒组织相对应。这样,在 σ, k_h -图中就将周期的 5 分钟振动和无规的米粒组织分开来了。并且还可以看到,周期为 5 分钟的振动是属于 p 模式的振动。Deubner (1975, 1977)[18],[19] 和 Rhodes et al. (1977)[20] 根据高分辨的观测进一步得到,在 σ, k_h -图中太阳 5 分钟振动的功率分布是集中在一些分离区域,如图 4 中的虚线所示,这个观测结果与 Ando 和 Osaki (1975)[21] 理论计算太阳 p - 模非径向振动的结果基本相符合。图 4 中的实线是理论得到的结果。

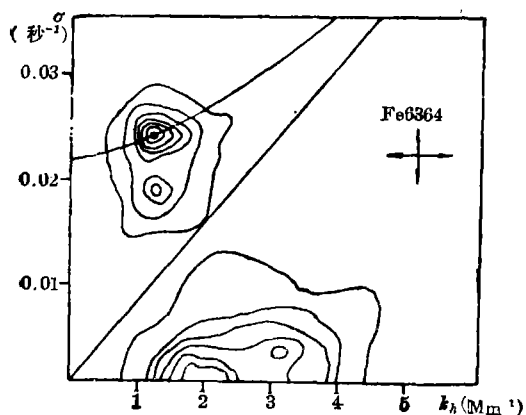


图 3

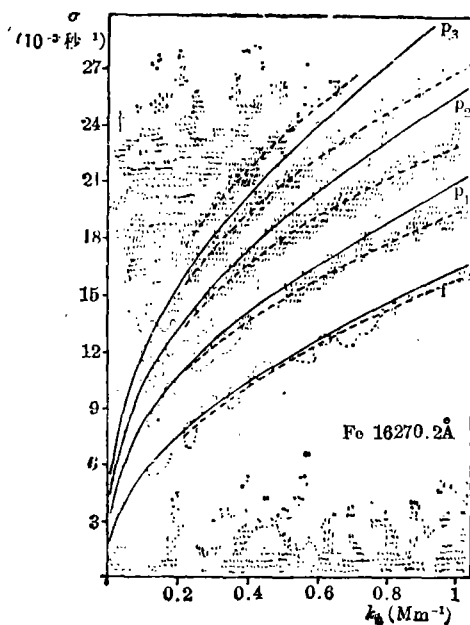


图 4

Severny et al. (1976)[22], Kotov et al. (1978)[23] 观测到太阳光谱线位移有 160 分钟的周期变化,并确定太阳有周期为 160 分钟的振动,其振幅为 0.5 米/秒。这个观测已被 Scherrer et al. (1979)[24], Fossat et al. (1981)[25] 所证实。

根据太阳 5 分钟振动的理论模型计算,可以得知太阳内部结构和动力学性质的一些新信息:太阳光球层下面对流层的厚度大约为 $0.3R_{\odot}$;太阳内氢的丰度为 $Y = 0.25$, 重元素的丰度为 $Z = 0.02$;太阳光球层下面 11,000 公里至 15,000 公里区域自转速度比太阳表面的自转速度快约 80 米/秒。

关于太阳振动的总结性文章有[26—31]。

2. 脉动的白矮星

观测发现,DA 型白矮星和 DB 型白矮星的温度和颜色有周期性变化,其周期比径向振

动周期长两个数量级。此外，它们在赫罗图中的分布也很有规律。DA 型白矮星在赫罗图中分布在一条很窄的带内（有效温度在 $\sim 10,000 \sim 15,000$ K 范围）。DB 型白矮星分布在一条温度较高的带内（有效温度在 $20,000 \sim 30,000$ K 内）。

Winget et al. (1982) [32] 计算了一颗 $0.6 M_{\odot}$ 的白矮星理论模型并发现：当这颗白矮星演化到赫罗图中的一定区域内，它就会因不稳定而振动。振动是属于靠近表面的氦部分电离区内，由 κ - 机制引起的低次 ($l = 1, 2, 3$) g - 模式非径向振动。其振动周期和观测到的 ZZ Ceti 型的 DA 白矮星振动周期相符合，并且赫罗图中的这个区域也和观测到的 ZZ Ceti 型 DA 白矮星的分布窄带相符合。此外，当这颗白矮星模型演化到赫罗图中另一较高温度区域内时，在靠近表面的氦部分电离区内，又会由于 κ - 机制引起低次的 g - 模式振动。其振动周期以及在赫罗图中这个不稳定区域，都和观测到的 DB 型白矮星（如 GD358, PG1654 + 160）的振动周期以及在赫罗图中的分布窄带相符合。关于脉动白矮星可参看 [33, 34]。

3. 快速振动的 Ap 星

Kurtz (1982) [35] 发现一批快速振动的 Ap 型星，它们是较冷的磁星。光变的振幅很小， $\Delta B \leq 0.016$ 星等。周期在 4—15 分钟。对于 Ap 型磁星的振动，Shibahashi (1983) [36], Cox (1984) [37] 采用高阶 ($k \approx 40$), 低次 ($l = 1, 2$) 和 $m = 0$ 的 p - 模式振动来描述。当恒星外层存在一超绝热对流层，并且对流层有很强的磁场时，就可因不稳定而引起振动。

4. 谱线轮廓周期变化的早型星

Smith (1977) [38] 发现，在有锐线的 O8—B5 型早型星中，有些星的谱线轮廓有周期性变化（如 53 Per）：谱线轮廓周期地由窄变宽，并且变歪，但谱线的等值宽度不变。周期为 0.3—2 天。近年来，在有中等自转速度的 B 型星中（如 ϵ Per, η Lep, δ Sco, α Vir），在快速自转的 Be 星中（如 28 CMa, η Cen, μ Cen, λ Eri, EM Cep），都发现了谱线轮廓周期变化的现象。

一般认为，早型星中存在的谱线轮廓周期变化现象，是由于恒星自转和有非径向振动两

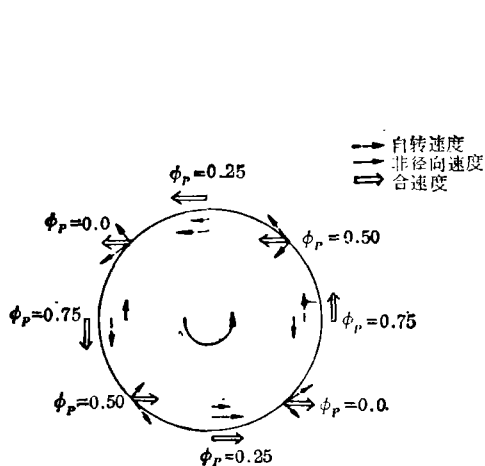


图 5. 一颗有自转和非径向振动的恒星 ($l=2, m=2$), 其赤道面的速度矢量。

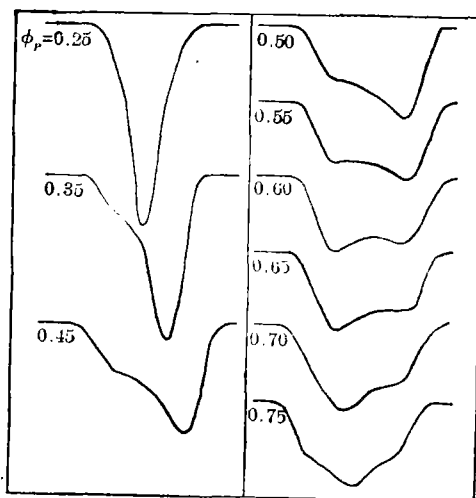


图 6. 恒星有自转和非径向振动 ($l=2, m=1$) 时，理论得到的谱线轮廓。

种效应所引起,图 5 给出一颗有自转和非径向振动的恒星($l=2, m=2$),其赤道面的速度矢量。在相位 $\phi_p=0.25$ 时,合速度方向与视向垂直,这时谱线最窄。在 $\phi_p=0.75$ 时,合速度一边离开观测者,一边朝向观测者,这时谱线最宽。图 6 是理论得到的谱线轮廓周期变化的现象。关于这方面的工作可参看[13],[39]。

二、大质量星的演化

大质量星($M \sim 10M_\odot$)的一般特性是:有很大的质量损失速率,有明显的不稳定现象(光变 $\Delta m \sim 10^{-2}$ 星等,视向速度变化 $\Delta v \approx 1$ 公里/秒),有些大质量星的表面化学组成很特殊。关于大质量星,以下两个问题尤其引起人们的兴趣:

1. 关于大质量星的非稳定性与质量上限问题

Ziebarth (1970)[40], Simon 和 Stothers (1970)[41]根据线性脉动理论,认为当恒星的质量大约为 $90M_\odot$ 时,就会产生振动不稳定性。振幅会不断增大而发生灾难性结果。Appenzeller (1970a,b)[42],[43], Talbot (1971a,b)[44],[45]和 Papaloizou (1973)[46]等人在考虑了非线性项的效应以后指出,恒星的振幅不会无限增大而达到一个有限值。如 Appenzeller (1970b)指出,当 $M = 130M_\odot$, 并且有质量损失率为 $4 \times 10^{-5}M_\odot / \text{年}$ 时,恒星振动的振幅仍然不很大。恒星在振动时会产生连续的、非灾难性的星风形式的质量损失。

除了要考虑由于质量过大会引起恒星内部产生振动不稳定性外, Eddington (1921)[47]还指出,当恒星的质量过大,因而辐射压过大,并在恒星表面层内辐射压大于引力作用时,辐射压可以将恒星的外层直接吹压出去,从而出现非连续的、爆发性的质量损失。在恒星外层,根据向外的辐射压力和向内的引力达到平衡的特性, Eddington 得到一个关系式:

$$\bar{\kappa}(L/M) = 1.31 \times 10^4 \quad (6)$$

式中 $\bar{\kappa}$ 为辐射流的平均不透明度,光度 L 和质量 M 都是以太阳的光度和质量为单位。关系式(6)称为 Eddington 极限。如果恒星的光度和质量比达到和超过这个极限,则恒星的辐射压可以将外层直接吹压出去,产生爆发性的质量损失。

严格说, Eddington 极限只对于非常热的 O 型星是正确的,因为对于这些星辐射压是主要的。对于温度较低的星,例如晚型冷超巨星,辐射压已经不重要,而湍流压可能很重要。对于 B 型星来说,恒星自转产生的离心力很重要。De Jager (1980)[48]根据在恒星外层,辐射压、自转产生的离心力、湍流压和引力达到平衡时,得到了一极限关系,称为 De Jager 极限。

实际观测情况是:在我们银河系内以及在距我们很近的一些星系内,很少观测到质量大于 $110M_\odot$ 的大质量星,并且它们的光度和质量比都小于 Eddington 极限。但是也发现了几颗光度特别大,因而质量也特别大的星,它们的光度与质量之比已接近于 Eddington 极限或 De Jager 极限。例如属于我们银河系的 ηCar ,它的光度可达 $5 \times 10^6 L_\odot$, 初始质量可能有 $200M_\odot$ 。历史上已观测到这颗星有多次的大爆发,现在可以观测到围绕在这颗星的周围有一个很小的气体和尘埃云,以每秒几百公里的速度向外散开。这说明 ηCar 是不断发生非连续的、爆发性质量损失的星,它的外壳有不断向外大量喷射质量的现象。和 ηCar

相类似的星还有 P Cyg、S Dor 以及在旋涡星系 M31、M33 中的 Hubble-Sandage 变星 (例如 V83)。关于上述特殊星的综述报导可参看 [48—50]。

近年来人们在大麦哲伦云中发现了一颗迄今为止光度最大, 因而质量也是最大的星叫 R136a 或者 HD 38268。它是巨星云 30 Doradus 的中心天体。它的光度比 η Car 还要大得多, 可达 $1.5 \times 10^7 L_{\odot}$ 。现在比较肯定 R 136a 属于双星, 它的质量可能为 200—1000 M_{\odot} 。有关 R136a 的各种性质目前正在观测中 (可参看 [49], [50], [51])。

2. 大质量星的赫罗图

大质量星的赫罗图有三个引起人们特别感兴趣的特性, 它们是:

(1) 在大质量星的赫罗图中存在一个光度的上边界。迄今为止, 绝大多数观测到的大质

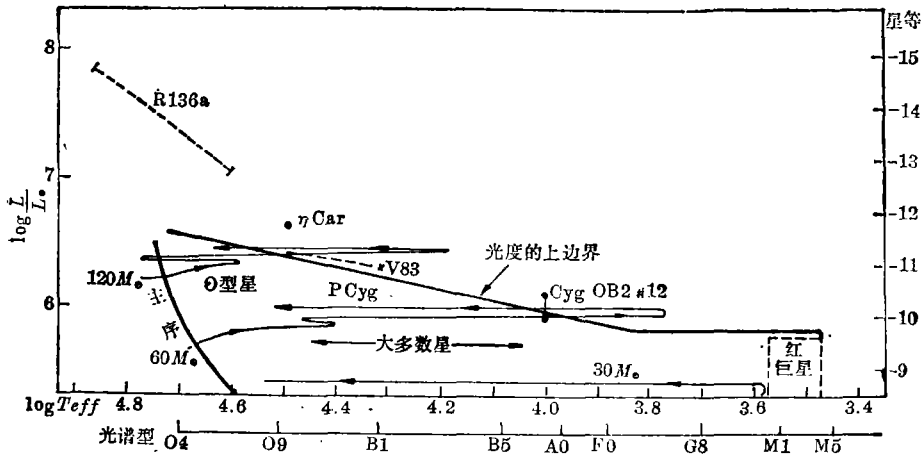


图 7. 大质量星赫罗图中的光度上边界。

量亮星, 它们的光度都不超过一定的上界, 表现在赫罗图中存在一个光度的上边界 (图 7)。这个光度上边界在 O 型星范围为最高, 可达 $M_{bol} = -12$ 。随着恒星有效温度的降低, 这个边界值也下降。进入冷巨星区域后, 这个边界维持恒定不变。如果注意到一些光度特别大, 并且发生非连续的、爆发性质量损失的星, 如 η Car, P Cyg, R136a 等星, 由它们在赫罗图中的位置则可以知道, 在 O 型星范围内, 观测到的光度的上边界, 还没有达到 Eddington 极限。Eddington 光度极限很可能通过 R136a, η Car 星所在的位置。但对于中等的热星以及冷星来说, 由于 P Cyg 的位置已靠近观测到的光度的上边界, 因此观测到的光度上边界很可能已接近于 De Jager 极限。

(2) Lamb et al. (1976) [52], Stothers 和 Chin (1976) [53] 等人发现, 在太阳附近的亮星中, 观测到的红超巨星的数目与蓝超巨星的数目之比, 比用质量守恒的演化理论所预言的比值大 4 倍。

(3) 观测得到的大质量星的主序带比较宽, 可以延伸到 A0 光谱型。然而, 用质量守恒的演化理论所得到的主序带比较窄, 只能延伸到 O9.5—B0 光谱型。Meylan 和 Maeder (1982) [54] 将这称为主序变宽现象。

根据上述特性,人们自然会产生以下的问题:对于特别热,因而质量也特别大的星($M > 50M_{\odot}$),当中心核内的氢燃烧尽以后,恒星的外壳要膨胀,在赫罗图中的演化程将会沿着一条水平的直线,穿过观测到的光度上边界而进入红超巨星区域(图7)。是什么原因阻止了恒星的演化程,使它不能穿过光度的上边界,因而不存在温度很低(低于15,000K)而光度很大(超过 $10^6 L_{\odot}$)的红超巨星呢?又是什么原因造成观测到的红超巨星数目与蓝超巨星数目的比值以及主序带的宽度,和用质量守恒的演化理论所预言的结果相矛盾呢?

对于大质量星首先应该考虑到它们有由很大的星风所引起的质量损失。目前已有很多文章如[55—68],考虑了质量损失后对大质量星的演化进行了计算。

对于初始质量大于 $50M_{\odot}$ 的恒星,如果考虑到因星风引起的质量损失时,会得到这样的演化结果:恒星在主序阶段以及主序后的蓝超巨星阶段,将损失全部的外壳,而使原始的核暴露于表面。恒星在赫罗图中的演化程将在蓝超巨星阶段回转向蓝方向运动,经过Hubble-Sandage变星(如V83)阶段而变成WN或WC型的沃尔夫-拉叶星。因此,这类星不会演化变成红超巨星,从而解释了为什么没有温度很低、而光度很大的红超巨星。Humphreys和Davison(1984)[49]比较深入地指出,如果在演化计算中采用连续的、非爆炸性的质量损失速率,则质量大于 $50M_{\odot}$ 的恒星,不可能在主序阶段和蓝超巨星阶段将全部外壳损失掉,他们认为可能是当恒星的演化程接近到光度的上边界(即接近到De Jager极限)时,恒星会产生多次非连续的、爆炸性的质量损失,从而将全部外壳损失掉。

对于初始质量在 $20-50M_{\odot}$ 之间的恒星,质量损失将使它们在主序阶段以及在蓝超巨星阶段损失相当部分的外壳,但不会将全部外壳损失掉,它们会迅速地演化到红超巨星区域,此时中心核处于早期的氦燃烧阶段。在红超巨星阶段,由于强大的星风质量损失,使恒星失掉全部外壳,然后恒星在赫罗图中的演化程折转向蓝方向运动,直到变成沃尔夫-拉叶星[69],[60]。考虑了质量损失以后,就使红超巨星的数目与蓝超巨星的数目比值,比质量守恒情况的比值大4至5倍,和观测结果相符合[60]。

以考虑了质量损失的演化模型计算所得到的主序带宽度,已经比以质量守恒情况所得到的主序带宽许多。可是,和观测得到的主序带相比,仍有差距。Bressan et al.(1981)[70],Stothers和Chin(1981)[71],Doom(1982)[72],[73]等人在进行大质量星的演化计算时,不仅考虑了质量损失,同时还考虑了对流超射。他们得到的结果使主序带更加变宽,但仍然不能和观测相符合。Bertelli et al.(1984)[74]在理论计算中同时考虑了质量损失、对流超射以及在CNO元素电离区不透明度突变等几种效应,可以使主序带的宽度和观测结果相一致。但是,这里的关键问题是:是否真实存在不透明度的突变?Maeder(1982)[75]在大质量星计算中,采用质量损失和湍流混合两种机制,同样也能使主序带的宽度和观测结果相一致。

有关大质量星赫罗图的综合论述可参看[49],[76],[77]。

参 考 文 献

- [1] Fernie, J. D., in Reports on Astronomy, 284, ed. by R. M. West, Dordrecht, Reidel, (1985).
- [2] Kurtz, D. W., in Reports on Astronomy, 287, ed. by R. M. West, Dordrecht, Reidel, (1985).
- [3] Szeidl, B., in Reports on Astronomy, 289, ed. by R. M. West, Dordrecht, Reidel, (1985).
- [4] Baker, N. and Kippenhahn, R., *Z. Astrophys.*, 54 (1962), 114.

- [5] Baker, N. and Kippenhahn, R., *Ap. J.*, **142** (1965), 868.
- [6] Hofmeister, E., *Z. Astrophys.*, **05** (1967), 164.
- [7] I. Iben, JR., *IAU Symp.*, No. 59, 3, (1974).
- [8] Cox, J. P., *Theory of Stellar Pulsation*, Princeton University Press, (1980).
- [9] Percy, J. R., in *Highlights of Astronomy*, 457, ed. by P. A. Wayman, Dordrecht, Reidel, (1980).
- [10] Cox, A. N., in *Highlights of Astronomy*, 487, ed. by P. A. Wayman, Dordrecht, Reidel, (1980).
- [11] Madore B. F., *Cepheids: Theory and Observations*, Cambridge University Press, (1985).
- [12] Smith, M. A., in *Highlights of Astronomy*, 461, ed. by P. A. Wayman, Dordrecht, Reidel, (1980).
- [13] Percy, J. R., in *Reports on Astronomy*, 281, ed. by R. M. West, Dordrecht, Reidel, (1985).
- [14] Cox, A. N. and Hodson, S. W., in *Pulsations in Classical and Cataclysmic Variable Stars*, 332, Boulder, Colo., (1982).
- [15] Osaki, Y., in *Pulsations in Classical and Cataclysmic Variable Stars*, 303, Boulder, Colo. (1982).
- [16] Leighton, R. B., *IAU Symp.*, No. 12, 321, (1960).
- [17] Frazier, E. N., *Z. Astrophys.*, **68** (1968), 345.
- [18] Deubner, F. L., *Astron. Astrophys.*, **44** (1975), 371.
- [19] Deubner, F. L., in *the Energy Balance and Hydrodynamics of the Solar Chromosphere and Corona*, 45, ed. by R.-M. Bonnet and Ph. Delache, (1977).
- [20] Rhodes, E. J., Jr. and Ulrich, R. K., *Bull. American Astron. Soc.*, **9** (1977), 336.
- [21] Ando, H. and Osaki, Y., *Publ. Astron. Soc. Japan*, **27** (1975), 581.
- [22] Severny, A. B., Kotov, V. A. and Tsap, T. T., *Nature*, **259** (1976), 87.
- [23] Kotov, V. A., Severny, A. B. and Tsap, T. T., *M. N. R. A. S.*, **183** (1978), 61.
- [24] Scherrer, P. H. et al., *Nature*, **277** (1979), 635.
- [25] Fossat, E. et al., *Sol. Phys.*, **74** (1981), 59.
- [26] Stein, R. F. and Leibacher, J. W., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **12** (1974), 407.
- [27] Deubner, F.-L., in *Highlights of Astronomy*, 75, ed. by P. A. Wayman, Dordrecht, Reidel, (1980).
- [28] Christensen-Dalsgaard, J., *Adv. Space Res.*, **2** (1983), 11.
- [29] Deubner, F.-L. and Gough, D., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **22** (1984), 593.
- [30] T. R. Duvall, Jr., in *Reports on Astronomy*, 97, ed. by R. M. West, Dordrecht, Reidel, (1985).
- [31] Christensen-Dalsgaard, J., in *Reports on Astronomy*, 486, ed. by R. M. West, Dordrecht, Reidel, (1985).
- [32] Winget, D. E., Van Horn, H. M., Tassoul, M. and Hansen, C. J., *Ap. J. Lett.* **252** (1982), L65.
- [33] Dziembowski, W., in *Highlights of Astronomy*, 469, ed. by P. A. Wayman, Dordrecht, Reidel, (1980).
- [34] Robinson, E. R., in *Reports on Astronomy*, 303, ed. by R. M. West, Dordrecht, Reidel, (1985).
- [35] Kurtz, D. W., *M. N. R. A. S.*, **200** (1982), 807.
- [36] Shibahashi, H., *Ap. J.*, **275** (1983), L5.
- [37] Cox, J. P., *Ap. J.*, **280** (1984), 220.
- [38] Smith, M. A., *Ap. J.*, **215** (1977), 574.
- [39] Unno, W., Osaki, Y., Ando, H. and Shibahashi, H., *Nonradial Oscillations of Stars*, University of Tokyo Press, (1979).
- [40] Ziebarth, K., *Ap. J.*, **162** (1970), 947.
- [41] Simon, N. R. and Stothers, R., *Astron. Astrophys.*, **6** (1970), 183.
- [42] Appenzeller, I., *Astron. Astrophys.*, **5** (1970a), 355.
- [43] Appenzeller, I., *Astron. Astrophys.*, **9** (1970b), 216.
- [44] Talbot, R. J., *Ap. J.*, **163** (1971a), 17.
- [45] Talbot, R. J., *Ap. J.*, **165** (1971b), 121.
- [46] Papaloizou, J. C. B., *M. N. R. A. S.*, **162** (1973), 169.
- [47] Eddington, A. S., *Z. Phys.*, **7** (1921), 351.
- [48] De Jager, C., in *The Brightest Star*, 7—11, Reidel Publishing Company, (1980).
- [49] Humphreys, R. M. and Davison, K., *Science*, **223** (1984), 243.

- [50] Humphreys, R. M., in *Reports on Astronomy*, 480, ed. by R. M. West, Dordrecht, Reidel, (1985).
- [51] IAU Symp., No. 108, Structure and Evolution of the Magellanic clouds, (1984).
- [52] Lamb, S. A., Iben, I. and Howard, W. N., *Ap. J.*, **207** (1976), 209.
- [53] Stothers, R. and Chin, C. W., *Ap. J.*, **204** (1976), 472.
- [54] Meylan, G. and Maeder, A., *Astron. Astrophys.*, **108** (1982), 148.
- [55] De Loore, C., de Greve, J. P. and Vanbeveren, D., *Astron. Astrophys.*, **67** (1978), 373.
- [56] Chiosi, C., Nasi, E. and Bertelli, G., *Astron. Astrophys.*, **74** (1979), 62.
- [57] Stothers, R. and Chin, C. W., *Ap. J.*, **233** (1979), 267.
- [58] Maeder, A., *Astron. Astrophys.*, **82** (1980), 101.
- [59] Maeder, A., *Astron. Astrophys.*, **89** (1981), 97.
- [60] Maeder, A., *Astron. Astrophys.*, **102** (1981), 401.
- [61] Maeder, A., *Astron. Astrophys.*, **120** (1983), 113.
- [62] De Loore, C. and de Greve, J. P., in *The Most Massive Stars*, ESO Workshop, 85, (1981).
- [63] Chiosi, C., in *The Most Massive Stars*, ESO Workshop, 27, (1981).
- [64] Falk, H. J. and Mitalas, R., *M. N. R., A. S.*, **196** (1981), 225.
- [65] Falk, H. J. and Mitalas, R., *M. N. R., A. S.*, **202** (1983), 19.
- [66] Sreenivasan, S. R. and Wilson, W. J. F., *Ap. J.*, **254** (1982), 287.
- [67] Brunish, W. M. and Truran, J. W., *Ap. J.*, **256** (1982), 247.
- [68] Brunish, W. M. and Truran, J. W., *Ap. J. Suppl. Ser.*, **49** (1982), 447.
- [69] Chiosi, C., Nasi, E. and Sreenivasan, S. R., *Astron. Astrophys.*, **63** (1978), 103.
- [70] Bressan, A. G., Bertelli, G. and Chiosi, C., *Astron. Astrophys.*, **102** (1981), 25.
- [71] Stothers, R. and Chin, C. W., *Ap. J.*, **247** (1981), 1063.
- [72] Doom, C., *Astron. Astrophys.*, **116** (1982), 303.
- [73] Doom, C., *Astron. Astrophys.*, **116** (1982), 308.
- [74] Bertelli, G., Bressan, A. G. and Chiosi, C., *Astron. Astrophys.*, **130** (1984), 279.
- [75] Maeder, A., *Astron. Astrophys.*, **105** (1982), 149.
- [76] Maeder, C., IAU Symp., No. 105, 299, (1984).
- [77] Humphreys, R. M., IAU Symp., No. 105, 279, (1984).

(责任编辑 林一梅)

Some Interesting Problems in the Field of the Theory of Stellar Structure and Evolution (II)

Huang Runqian

(Yunnan Observatory, Academia Sinica)

Abstract

Two interesting problems in the field of the theory of stellar structure and evolution are described in this paper. Such as stellar oscillations and the evolution of massive stars.