

天体物理学讲座

第一讲 恒星的演化*

黄 润 乾

(中国科学院国家天文台云南天文台 中国科学院光学天文联合开放实验室 昆明 650011)

摘 要 恒星结构和演化理论是研究恒星内部的物理过程、结构和恒星如何演化的科学。文章介绍了恒星结构和演化模型的计算方法,恒星在赫罗图中的分布规律,恒星的形成和早期演化特性,质量不同的各类恒星从主序开始的演化进程,恒星演化的晚期阶段和产物:白矮星、超新星和中子星。

关键词 恒星演化,恒星内部结构

STELLAR EVOLUTION

HUANG Run-Qian

(Yunnan Observatory, National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, United Laboratory of Optical Astronomy, Kunming 650011, China)

Abstract The theory of stellar structure and evolution concerns the various physical processes inside stars. An introduction is given to a model of the structure and evolution of stars, their distribution in the Hertzsprung-Russell diagram, their formation and early evolution, the evolution from the main sequence for stars of different masses, the final stage of stellar evolution and the resulting white dwarfs, supernova and neutron stars.

Key words stellar evolution, stellar interior

1 引言

在浩瀚的夜空中,可以观测到各种类型的恒星:有温度很高、颜色发白或发蓝的早型星;有体积很大、颜色发红的红巨星;有亮度和半径会周期变化的变星;有体积很小、十分暗弱但颜色发白的白矮星;还有成双在一起、互相绕转的双星等等。这些不同类型的恒星,它们内部的结构性能,如温度、密度、压强和化学组成的分布如何?在它们的内部会发生哪些物理过程?是什么原因使它们发光,同时又使它们演变成为具有各种不同特性的恒星?这些都是恒星结构和演化理论所要研究的内容。

恒星的内部是我们无法直接观测到的。怎样才能了解恒星内部的情况,以及引起恒星演化的原因?恒星结构和演化理论采取的方法是:首先需要对恒星作一些简化而合理的假设,如假设恒星是球形对称结构的高温气体球;满足流体静力学平衡条件;遵守能量守恒和其他在地面上已知的物理定律。在这

些假设基础上,可以建立起一系列描述恒星内部各种物理过程及其变化的微分方程组。或者说,建立一个模拟恒星内部结构和演化的理论模型。再借助于计算机解这个模型,就可以得到恒星的内部结构和演化的规律。由理论得到的恒星结构和演化规律需要和观测到的恒星的现象和变化规律相比较,如果理论结果能够解释各种恒星的现象和观测到的各种恒星变化规律,则可以认为这个理论是正确的,由它所得到的恒星内部结构和演化规律是合理的。

人们通过对恒星各种物理参数进行大量观测和积累后,发现了恒星的“赫罗图”。在恒星的赫罗图中,各类恒星的分布显现出一些特殊的规律。于是,恒星赫罗图中的各种规律就成为目前用于检验恒星结构和演化理论是否正确的重要工具之一。

通过理论和观测结果的不断比较和验证,证实恒星结构和演化理论取得了重要进展。恒星为什么

* 国家自然科学基金(批准号:10073020)资助项目
2000 - 10 - 13 收到初稿,2000 - 12 - 25 修回

会演化? 主要是因为恒星的内部不断发生着许多物理过程, 这些物理过程的发生和变化, 使得整个恒星的性质随之变化. 在这些物理过程中, 最主要的是恒星内部发生的热核反应过程. 热核反应释放出的能量是维持恒星发光和不断向外辐射出大量能量的主要能源. 同时, 由于热核反应, 使得恒星内部的化学组成在不断变化, 如恒星中心区域内的元素可以由氢变为氦, 又由氦变为碳和氧等等. 在不同的温度下, 恒星中心区域内不同元素发生热核反应时所释放出的能量大小不同, 这会使得恒星的光度以及恒星内部的温度、密度和压强的分布不断变化. 恒星表面的温度、颜色和体积也随着变化. 我们在天空中所观测到的各种不同颜色、不同温度和光度、不同化学组成和不同大小的恒星, 实际是质量不同的恒星在不同演化阶段的表现而已. 这就像人类在不同年龄时, 其身高、体重、外貌等不同一样.

2 恒星的结构和演化模型

恒星内部的物理状态和几何结构十分复杂, 必须先对恒星的几何结构和物理状态作一些简化假设, 才能对其结构和演化进行研究. 这些简化假设是:

- (1) 假设恒星的几何结构为球对称结构;
- (2) 将恒星内部划分为许多同心球层, 并假设每一球层内各种物理和化学参数都是相同的;
- (3) 假设恒星内部满足流体静力学平衡条件;
- (4) 假设磁场力、潮汐力和自转可以忽略;
- (5) 假设恒星的总质量 M 不变.

根据这些假设, 可以给出下列描述恒星内部结构及其变化的基本方程组^[1]:

流体静力学平衡方程

$$\frac{\partial P}{\partial M} = - \frac{GM}{4\pi r^2}; \quad (1)$$

质量方程

$$\frac{\partial r}{\partial M} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}; \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial L_r}{\partial M} = \epsilon_n - \epsilon_\nu + \epsilon_g; \quad (3)$$

能量传递方程

$$\frac{\partial T}{\partial M} = - \frac{GM}{4\pi r^4} \frac{T}{P} \frac{d \ln T}{d \ln P}; \quad (4)$$

化学组成变化方程

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{\int \left(\sum_n \frac{\epsilon_{ni}}{E_{ni}} - \sum_k \frac{\epsilon_{ki}}{E_{ik}} \right) dM}{\int dM}. \quad (5)$$

在以上方程中包含了 5 个未知量: T (温度), P (压强), r (与恒星中心的距离), L_r (光度) 及 Y_i (元素的质量丰度), 以及包含一些与物质有关的函数, 如: ρ (密度), κ (物质的不透明度), ϵ_n (产能率), ϵ_ν (中微子能量损失率), ϵ_g (物质的热能变化率), E_{ni} (每克 n 粒子经过核反应成为 i 粒子所释放的能量), ϵ_{ki} (每秒每克 n 粒子经过核反应成为 i 粒子所释放的能量). 这些物质函数可由已知的物理规律得到. 式中的 M 表示以 r 为半径的球体内的质量, G 为引力常数.

(1)–(4) 式有 4 个边界条件, 即在恒星中心处 ($M=0$) 有两个边界条件: $r=0$, $L_r=0$, 和在恒星表面处 ($M=M$) 有两个边界条件: $T=0$, $P=0$. (1)–(5) 式及其边界条件构成了恒星的结构和演化模型. 在给定恒星的质量和初始化学组成条件下, 解这个模型, 就可以得到恒星的内部结构和演化的规律.

上述恒星结构和演化模型简称标准恒星结构和演化模型, 是 1960 年前后由 Schwarzschild^[2], Kippenhahn 等^[3] 和 Iben^[4] 等人发展起来的. 但是, 天文观测发现, 有一些性质特殊的恒星, 它们不完全遵守标准恒星结构和演化模型的简化假设. 从而推动了恒星结构和演化模型的进一步发展.

天文观测证实, 有些早型星, 以及大质量星有很大的自转速度, 对于这类恒星必须考虑自转的影响, 而且它们的几何结构因为自转可以不是球对称结构. Kippenhahn 和 Thomas^[5], Meynet 和 Maeder^[6] 等人发展了考虑恒星自转和非球对称结构的恒星结构和演化模型. 天文观测还证实, 许多大质量恒星, 以及红巨星和 AGB 星存在严重的星风物质损失. De Loore 等^[7], Chiosi 和 Maeder^[8], Stothers 和 Chin^[9] 等发展了质量不守恒的恒星结构和演化模型.

对于相距很近、互相绕转的双星系统, 潮汐作用和系统转动作用对双星的结构和演化影响很大, 可以造成两星之间发生物质交换. Kippenhahn 和 Weigert^[10], Paczynski^[11,12], De Loore^[13], Vanbeveren^[14] 等人发展了双星的结构和演化模型. Huang 和 Taam^[15] 发展了有星风物质损失的双星结构和演化模型.

Baker 和 Kippenhahn^[16], Cox J P^[17], Cox A N 等^[18], Li^[19,20] 等人在恒星结构和演化模型基础上, 增加振动计算, 发展了变星的结构和演化模型.

3 赫罗图

通过天文观测可以得到恒星的光度以及恒星表面的有效温度. 若将恒星的光度对有效温度作图, 则得到所谓的赫罗图(见图 1). 图中的纵轴向上为光度, 横轴由右向左为有效温度. 在赫罗图中, 每颗星根据它的光度和有效温度对应于一个点. 天文观测证明, 恒星在赫罗图中的分布有明显的特性: 90% 的恒星密集于由左上方往右下方延伸的一条带内, 这条带称为主序. 太阳也在主序内. 恒星在主序内的分布规律是: 沿着主序由左上方往右下方进行, 恒星的色由白、蓝变红, 温度则由高变低, 同时恒星的质量由大变小. 位于主序上的恒星, 它们的质量和光度之间满足一定的关系($L \sim M^2$), 称为质 - 光关系. 在主序的右上方有少数超巨星分布在超巨星带内, 而在主序与超巨星带之间还有巨星带和亚巨星带. 此外, 在与主序几乎垂直走向的一个狭长带内, 分布有造父变星、室女座 W 型变星、天琴座 RR 变星等. 这条狭长带称为造父脉动不稳定带. 在主序的左下方有一条光度很低、半径很小的白矮星带. 为什么在赫罗图中恒星的分布是很不均匀的, 90% 的恒星密集于主序带上, 少数恒星分布在超巨星、巨星、亚巨星、白矮星等一些窄带上, 而在许多区域却没有恒星分布? 为什么主序上的恒星会满足质 - 光关系? 为什么沿着主序由左上方往右下方走, 恒星的色由白、蓝变红, 温度则由高变低, 同时质量由大变小?

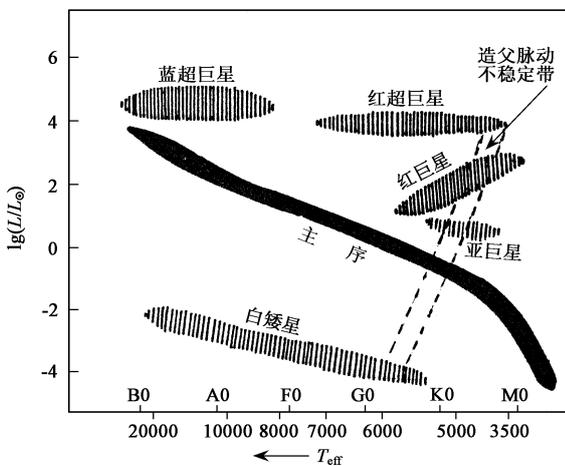


图 1 赫罗图

为什么各类变星会分布在一条造父脉动不稳定带内... 这许许多多观测得到的规律, 需要用恒星结构和演化理论的结果来解释, 同时它们也是检验恒星结构和演化理论的重要依据之一.

4 恒星的形成与早期演化

在银河系中, 除了有很多发光的恒星外, 在恒星与恒星之间还有许多由气体和尘埃组成的气体云, 称为星际云. 它们的温度很低 ($\sim 100\text{K}$), 密度很小 ($\sim 10^{-24}\text{gcm}^{-3}$). 恒星是由星际云坍缩而形成的. 根据 Jeans 的流体动力学非稳定性理论^[21], 当一个星际云的总质量 M 大于某一特定质量 M_J (称为 Jeans 质量) 时, 即当

$$M > M_J = 1.2 \times 10^5 M_{\odot} \left| \frac{T}{100\text{K}} \right|^{3/2} \cdot \left| \frac{\rho}{10^{24}\text{gcm}^{-3}} \right|^{-1/2} \mu^{-3/2} \quad (6)$$

时, 星际云内部会产生动力学非稳定性而引起坍缩.

由于 Jeans 质量是随密度而变化的 ($M_J \sim \rho^{-1/2}$), 所以当星际云坍缩并使密度变大时, M_J 随之变小, 这就造成星际云在坍缩过程中局部区域的质量又大于 Jeans 质量 M_J , 从而使局部区域又产生动力学非稳定而发生各自的坍缩, 导致星际云在坍缩过程中碎裂成许多小云团, 并且碎裂成的小云团仍然满足 (6) 式而继续坍缩和进一步碎裂, 直到最后碎裂成具有恒星质量范围的云团, 并坍缩成为恒星.

上述关于恒星是由星际云坍缩而形成的理论已为许多天文观测事实所证实. 例如可以观测到质量大和光度高的年轻的恒星都集中于银河系的旋臂中, 周围充满了星际云, 同时, 与恒星有成群、成团的性质相同, 星际云也是成群、成团的. 现在, 人们可以直接观测到, 有些星际云中密度很大的局部区域, 正在逐渐发亮形成恒星.

由星际云坍缩而形成的恒星称为原恒星. 它和通常的恒星不同, 虽然已达到流体静力学平衡, 但是内部的温度还很低, 不能产生热核反应. 整个内部还处于对流状态, 各处的化学组成是均匀的. 从外部看, 它是一个温度为 $3000-4000\text{K}$ 的暗红色气体球, 向外的辐射遵守黑体辐射规律. 在赫罗图中, 它位于右侧有效温度在 $3000-4000\text{K}$ 的范围内.

由于原恒星内部的温度过低, 不能发生热核反应, 为了补偿由表面辐射出去的能量损失, 恒星只有收缩, 在收缩时释放出引力能, 释放出的引力能中有

一部分用于补偿向外的辐射,另一部分则用于增加恒星内部的热能,使内部温度升高.因为恒星已达到流体静力学平衡,所以恒星的收缩是准静态的均匀收缩.这是恒星在早期演化阶段内部演变的主要特征.

恒星内部发生的各种物理过程是以不同的速率进行的,有的快,有的慢,或者说,它们以不同的时标进行.在早期演化阶段,恒星内部没有热核反应,仅仅依靠收缩,消耗其引力能来维持向外的辐射,其演化速率是以热时标进行.热时标 t_k 与恒星的质量 M 、半径 R 光度 L 有密切的关系,可以表示为^[1]

$$t_k = \frac{1}{2} q \frac{GM^2}{RL}, \quad (7)$$

对于一般恒星可取 $q = 1.5$,因此可以得到太阳的早期演化时间为 2×10^7 年.

Iben^[22] 计算了 $0.5 M_{\odot}$ 至 $15 M_{\odot}$ 恒星由原恒星演化到恒星中心区域发生热核反应时(这个阶段称为早期演化阶段,或称主序前演化阶段)的演化情况,并给出它们在赫罗图中的演化轨迹(见图2).在演化轨迹上的1点为原恒星时,8点为恒星中心开始发生热核反应时.由图2可以看出,恒星收缩时温度逐渐升高,因此演化轨迹是由右向左运动,并且质量越大的恒星向左运动的速度越快,即温度升高越快,越早地到达图中的8点,内部开始发生热核反应.并且质量越大的恒星,光度也更大,因而大质量恒星演化轨迹上的8点位于图中的左上方.反之,质量越小的恒星,演化越慢,到达8点的时间越晚,又因为光度小,演化轨迹上的8点位于赫罗图中的右下方.

在恒星收缩时,内部结构变化的另一重要特征是,恒星中心区域的温度梯度升高较快,使得中心区域由对流状态变为辐射平衡状态,并且辐射平衡区在恒星收缩过程中不断向外扩大.当恒星演化到达8点时,恒星中心区域的温度已升高到可以使氢发生热核反应.特别值得注意的是,不同质量的恒星开始发生热核反应的8点,都位于主序的左边缘上,人们将主序的左边缘称为零龄主序.前面已经指出,天文观测发现,天空中绝大部分恒星在赫罗图中的位置都落在一条由左上方向右下方延伸的带上,这条带称为主序.现在,由恒星演化理论使人们了解到主序的真正物理意义,即位于主序上的恒星,内部正在发生氢的热核反应.恒星演化理论也使人们了解到,为什么沿着主序由左上方向右下方走,恒星的质量由大变小,温度由高变低,光度则由大变小.这是因为不同质量的恒星在主序前的早期演化阶段中的演

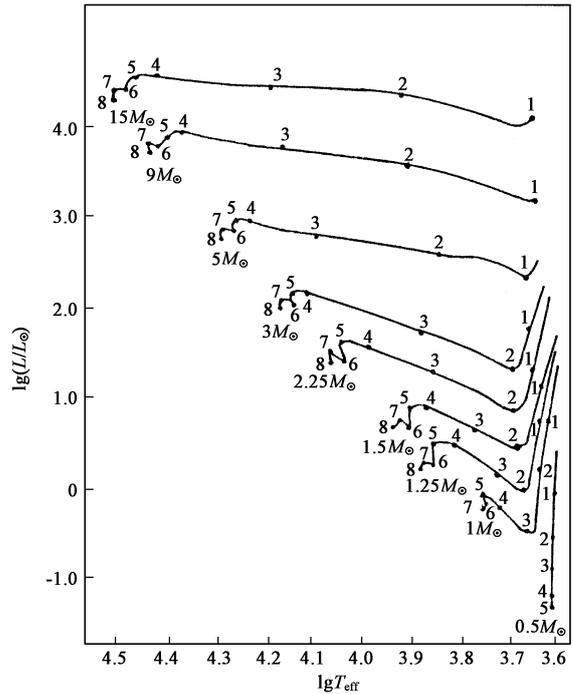


图2 恒星早期演化阶段在赫罗图中的演化轨迹

化速度和光度不同,因而它们到达主序的位置不同所造成的.

恒星在主序前的收缩阶段,是以热时标演化的,然而从零龄主序开始,内部发生热核反应,尤其是氢的热核反应速度极慢,恒星以非常慢的核时标演化.核时标与恒星的质量 M 及光度 L 的关系可以表示为^[1]:

$$t_N = 6.3 \times 10^{18} \frac{M}{L}. \quad (8)$$

对于太阳,将其中心核内的氢燃烧完所需时间为 $t_N \cong 10^{11}$ 年.

对于任何质量的恒星,主序以前所经历的时间相对于零龄主序后的演化时间都是极为短暂的.因此,似乎恒星可以将主序前的演化时间忽略,恒星的年龄只从它开始发生氢的热核反应时开始计算.这就是主序的左边缘称为零龄主序的原因.

5 主序及主序后的演化

从零龄主序开始,恒星中心核内发生氢聚变为氦的热核反应.这时恒星的能源主要是氢聚合为氦时释放出的能量.同时恒星在赫罗图中的演化轨迹将离开零龄主序往右,向红巨星方向运动.当恒星中心核内的氢都聚变(或称燃烧)成氦时,就结束了主序演化阶段.因此,赫罗图中的主序有一定宽度.主

序的宽度是由质量不同的恒星中心核氢燃烧结束时在赫罗图中的位置所决定. 由于在恒星内部的化学组成中, 氢的含量最多, 例如太阳内部, 氢的质量丰度为 70%. 因为氢的质量丰度最大, 同时氢聚变为氦的热核反应又是以极慢的核时标进行, 并且只有当整个中心核内的氢都燃烧成氦以后, 恒星在赫罗图中的演化轨迹才会离开主序, 因此恒星几乎 90% 的时间都要停留在赫罗图中的主序内. 这也就是为什么在观测中人们发现绝大部分恒星是分布在赫罗图中的主序内.

对主序星的理论模型计算结果, 可以得到主序星的质量 M 与光度 L 的关系(简称质光关系)为

$$M \sim L^\alpha, \quad (9)$$

并得到对于 $M=1.0 M_\odot, \dots, 10 M_\odot$ 的主序星, α 的平均值为 3.88. 但对于全部主序星, α 的平均值为 3.2. 这个结果与观测得到的主序星的质-光关系很好地符合. 主序星的理论模型计算还给出主序星的中心温度和中心密度随质量变化的关系: 当主序星的质量减小时, 恒星中心的温度大约以 4 倍的速度减小, 而中心密度则大约以 100 倍的速度增大.

从恒星内部发生热核反应开始, 恒星内部的化学组成逐渐变化, 使恒星内部的化学组成变为非均匀的. 因此, 从零龄主序开始的有热核反应和化学组成非均匀的演化, 是和主序前没有热核反应和化学组成均匀的演化明显不同.

恒星的内部结构和演化性质与恒星的质量以及化学组成有密切关系. 按质量大小, 恒星可分三类: 小质量星 ($M < 2.3 M_\odot$), 中等质量星 ($2.3 M_\odot < M \leq 9 M_\odot$) 和大质量星 ($M > 9 M_\odot$), 下面分别研究这 3 类质量不同的恒星的演化.

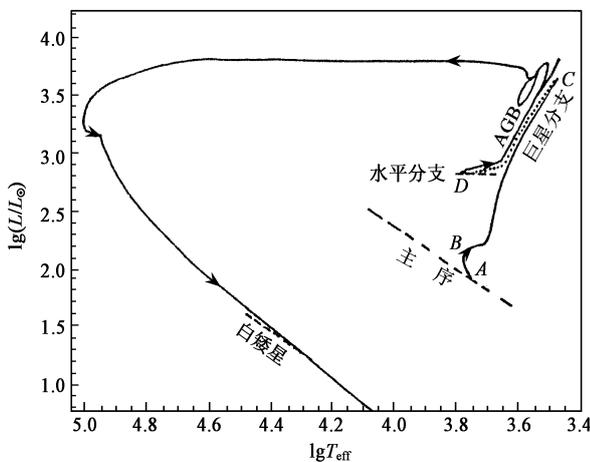


图 3 在赫罗图中小质量星的演化轨迹

5.1 小质量星的演化

图 3 给出一颗小质量星 ($M=1.3 M_\odot$) 在赫罗图中的演化轨迹示意图. 由图可以将它的演化全过程分为几个阶段: 主序、红巨星分支、水平分支、AGB 分支和白矮星分支. 但不是所有小质量星都能经历上述各个演化阶段. 一般地说, 质量越小的星 ($M < 0.5 M_\odot$) 越难经历上述全部过程. 图 3 中演化轨迹上的字母 A, B, C, ... 标志一些有意义的演化阶段. A \rightarrow B 为恒星中心核氢燃烧阶段, 即主序阶段. 在 A 点(零龄主序), 中心温度 $T_c = 1.48 \times 10^7 \text{ K}$, 恒星内部的结构为: 在中心核内发生热核反应, 并且中心核内是辐射平衡区, 而中心核外的大部分区域是对流的. 恒星演化到 B 点时, 中心核内的氢已全部燃烧完而变成一个氦核, 中心核内的热核反应熄灭, 但在氦核的外边缘出现了一氢燃烧壳层源.

由 B 到 C, 恒星内部的氦核向内收缩, 而氢燃烧壳层源外部的壳层向外膨胀, 使恒星迅速演变为一颗红巨星. 恒星在赫罗图中的演化轨迹则沿着红巨星分支迅速上升. 在这个演化阶段中, 氢燃烧壳层不断向外移动, 并不断“吞食”外壳的氢, 经过燃烧变为氦, 然后输送给内部的氦核. 于是氦核质量不断增大, 而同时又向内缩小. 因此氦核内的密度越来越大. 例如当氦核的质量 $M_c = 0.35 M_\odot$, 半径 $R_c = \frac{1}{40} R_\odot$ 时, 引力加速度 $g_c = 1.4 \times 10^7 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-3}$, 比太阳表面的引力加速度大 500 倍, 已接近白矮星表面的引力加速度. 因此可以将演化到红巨星分支的小质量星看成中心为一颗白矮星, 外面包有一个很大、很稀薄的、主要由氢组成的外壳. 由于氦核内的密度很高, 氦核内的气体不再是理想气体, 其物态方程也不再遵守理想气体物态方程. 这种氦核称为电子简并核. 因为在氦核内的电子已进入简并状态, 即电子按动量的分布不再遵守经典的麦克斯韦分布, 而是遵守量子统计的费米分布. 对于一个电子简并核, 可以理论证明它具有以下重要特性^[23,1]:

(1) 如果简并核的质量 M_c 小于临界质量 M_{ch} (称为 Chandrasekhar 极限质量), 则当简并核收缩时, 它的温度不会升高. 这时的物态方程为 $P_c = C \cdot \rho_c^{4/3}$, 即密度变化与温度无关. 反之, 如果简并核的质量 M_c 大于和等于临界质量 M_{ch} , 则当简并核收缩时, 它的温度可以升高, 并且温度随密度升高的关系遵守 $T_c \propto \rho_c^{1/3}$.

(2) 如果简并核的温度升高并达到发生热核反应, 则热核反应不是稳定的, 而是以十分剧烈的爆炸

式进行.即在极短时间内释放出大量的能量,因而使简并核的温度急剧上升,体积膨胀,密度下降.这种现象称为“核闪耀”.但是,核闪耀不会导致恒星爆炸,因为在发生核闪耀以后,核内的密度急剧下降,使电子简并状态解除,于是电子简并核又恢复成为正常核.

1.3 M_{\odot} 的小质量星演化到红巨星时,中心简并氦核的质量 M_c 小于临界质量 $M_{ch} (=0.45 M_{\odot})$,因此氦核的收缩不会导致氦核的温度升高.但是,由于氦核外部还有一氢燃烧壳层,它“吞食”外壳的氢所产生的氦可以不断使氦核的质量 M_c 增大,并且能够达到临界质量 M_{ch} .当氦核的质量达到和超过临界质量 M_{ch} 后,则氦核收缩时又可以升温.当恒星演化达到赫罗图中的 C 点时(见图 3),氦核的温度已升高到 $\sim 10^8$ K,并使氦发生燃烧.由于氦核是简并电子核,氦燃烧导致氦闪耀,即燃烧是非稳定的爆作式燃烧.

氦闪耀发生几秒钟至几分钟后,氦核内的密度急剧下降,使电子简并状态自动消失,因而热核反应又恢复为正常的核反应.氦闪耀之后,恒星的状态发生变化,它在赫罗图中的演化轨迹就落到左下方的零龄水平分支上(图 3 中的 D 点).零龄水平分支是小质量星中心核开始发生正常氢燃烧时在赫罗图中的位置.处于零龄水平分支的恒星的内部结构为:它的内部有两个能源,一个是中心氦核的燃烧,另一个是位于氦核外部的氢燃烧壳层源.

Kippenhahn 等人^[24], Strom 等人^[25], Iben 和 Renzini^[26] 研究了小质量星从零龄水平分支开始的演化.在赫罗图中,恒星的演化轨迹将离开零龄水平分支向右上方运动.当中心氦核内的氢燃烧完以后,中心核变为由 ^{12}C 和 ^{16}O 组成的 C-O 核,同时在 C-O 核外边缘出现一个氢燃烧壳层源.在氢燃烧壳层源之外,还有一个氢燃烧壳层源.中心 C-O 核迅速向内收缩,并变成电子简并核,壳层源外部的壳层迅速膨胀,使恒星变成一颗红巨星,恒星的演化轨迹则沿一条渐近巨星分支(AGB)向上运动.渐近巨星分支和红巨星分支不同,在红巨星分支情况下,恒星内部还没有发生氢燃烧.在 AGB 阶段的恒星,中心氢燃烧已经结束,恒星的能源主要来自两个燃烧壳层源.处于 AGB 阶段的恒星,有许多特殊的现象:首先恒星会产生巨大的星风物质损失(称为超星风),它可以使恒星在较短的时间内,将整个外壳丢失而变成一颗白矮星;其次,AGB 星会产生周期很长的脉动.

AGB 星的这些特殊现象是当前恒星物理研究的前沿课题^[27-30].

小质量星的演化结局:质量小于 $0.5 M_{\odot}$ 的恒星,在氢燃烧结束后形成的氦核是电子简并的,同时,氢燃烧壳层源也不能使氦核的质量增大到 M_{ch} ,因而氦核收缩不会使温度升高,不会发生氢燃烧.所以 $M < 0.5 M_{\odot}$ 的恒星将从红巨星直接演化成为白矮星,不经历水平分支和 AGB 分支.

$0.5 M_{\odot} < M < 2.3 M_{\odot}$ 的小质量星在 AGB 阶段会产生超星风,使恒星在较短的时间内将整个外壳丢失而变成一颗 C-O 白矮星.

5.2 中等质量星的演化

图 4 给出一颗 $5 M_{\odot}$ 中等质量恒星在赫罗图中的演化轨迹.由图 4 可以将它的演化全过程分为几个阶段:主序阶段、跨越赫罗图中的空隙区阶段、氢燃烧阶段和 AGB 阶段.图 4 中演化轨迹上的字母 A, B, C, ... 标志一些有意义的演化阶段. A → C 为恒星中心核氢燃烧阶段,即主序阶段.在 A 点时中心核是对流的,而恒星的外壳是辐射平衡的.当演化到 C 点时(年龄为 5.63×10^7 a),中心核内的氢全部烧完,变成一个氦核.在氦核的外边缘出现一个氢燃烧壳层. C → D 为恒星以较快速度(热时标)跨越赫罗图中的空隙区(Hertzsprung gap).在这个阶段中,氢燃烧壳层内的氦核向内收缩,而氢燃烧壳层外部的壳层则向外膨胀.由于恒星以较快速度跨越 C → D,在这个区域停留的时间极短(总共 3×10^6 a),因此赫办图中这个区域内的恒星很少,故称为赫罗图中的空隙区.

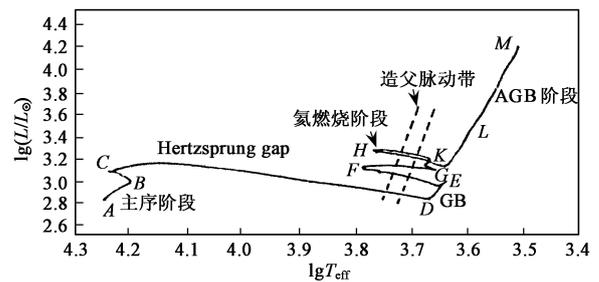


图 4 在赫罗图中中等质量恒星的演化轨迹

D → E → F → G 为氢燃烧阶段.在 D 点中心,氦核燃烧开始,但是由中心氦核提供的能量只是恒星能量的一小部分.恒星的大部分能量是由氢燃烧壳层提供.由 D → E 恒星外部对流层不断向内延伸.当达到 E 点时,外部对流层向内延伸到最深处,达到中心氦核的边缘,并将那里较丰富的氦搬运到表

面.由于中心氦核这时也是对流的,因此在 E 点处,几乎整个恒星都处于对流状态.

E → F → K 阶段恒星的演化轨迹在赫罗图中来回摆动,在这个阶段中,恒星的演化轨迹几次越过赫罗图中的造父脉动不稳定带.在恒星进入造父脉动不稳定带时,恒星的外壳内氢和氦的电离区就会产生不稳定而脉动,使恒星变为脉动变星.但在恒星的演化轨迹离开造父脉动不稳定带后,它又恢复到正常恒星.

当演化到 G 点时,中心氦核内的氦已全部燃烧完,而变成 C-O 核,在 C-O 核的外边缘出现一个氦燃烧壳层源.这时在恒星内部有两个壳层源:在氦燃烧壳层源外还有氢燃烧壳层源. K → L → M 为 AGB(渐近巨星分支)阶段,这时氦燃烧壳层以内的 C-O 核向内收缩,并使 C-O 核为电子简并核,氦燃烧壳层以外的外壳则迅速膨胀,使恒星变为红巨星.处于 AGB 阶段的恒星具有非常强大的星风物质损失(称为超星风)和长周期的脉动现象.同时,氦燃烧壳层也会产生氦闪耀现象.

中等质量星的演化结局:质量小于 $6-8 M_{\odot}$ 的中等质量星,AGB 阶段的中心 C-O 核是电子简并的,其质量 M_c 小于 M_{ch} ,并且氦燃烧壳层也不能使 M_c 增大达到 M_{ch} ,因此它们将演化成为 C-O 白矮星.质量大于 $8 M_{\odot}$ 的中等质量星,氦燃烧壳层可以使 M_c 增大达到 M_{ch} ,从而使简并 C-O 核收缩时温度升高而能够发生碳燃烧.它们的演化结局极大可能是演化成为超新星.

5.3 大质量星的演化

大质量星是银河系中最亮的一些恒星,虽然只占恒星总数的 10% 左右,但却有非常特殊的性质和意义.首先,大质量星在赫罗图中的分布出现两个特殊性质(见图 5):其一是在存在一个光度的上边界,又称 HD 极限,即在 HD 极限的上方极少有大质量星存在.大质量星的赫罗图中存在 HD 极限的事实,是和质量守恒的恒星演化理论相矛盾的.根据质量守恒的演化理论,大质量星的演化轨迹可以穿过 HD 极限进入其上方区域.因此,不应该存在 HD 极限.其次,由图 5 可以看出,大质量星的主序非常宽.这一事实也和质量守恒的恒星演化理论相矛盾.因为根据质量守恒的演化理论,大质量星的主序应该比观测得到的主序窄得多.

大质量星的另一个重要特性是有强大的星风物质损失.星风物质损失可以使大质量星在演化过程

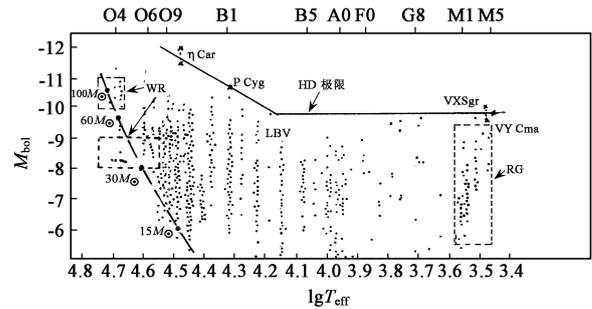


图 5 大质量恒星的赫罗图

中将其外壳大部或全部损失掉,暴露出内部的核.

根据以上观测特性可以知道,对于大质量星,必须采用质量不守恒的演化模型来计算它们的结构和演化.图 6 给出 $15-120 M_{\odot}$ 的大质量星,考虑了星风物质损失时在赫罗图中的演化轨迹^[7],图中左边有斜线的区域为大质量星中心氢燃烧区即主序,右边有斜线的区域为中心氦燃烧区.演化轨迹上第一个黑点表示氢燃烧开始点.有的演化轨迹上有第二个黑点,表示碳燃烧开始点.

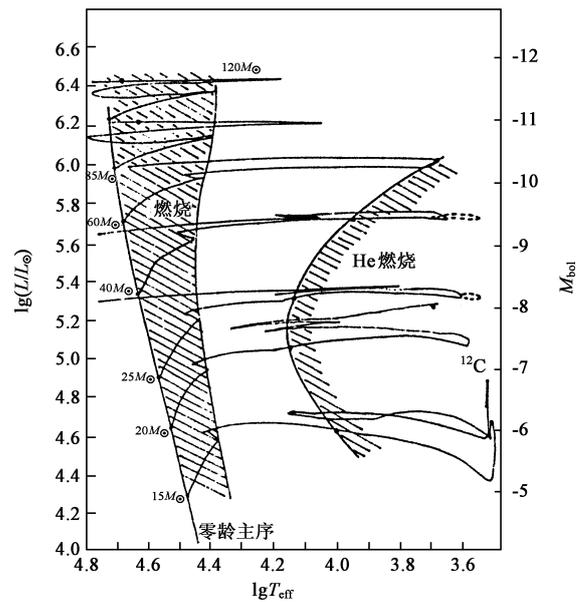


图 6 在赫罗图中大质量恒星的演化轨迹

在大质量星的演化计算中,考虑了星风物质损失的效应,会使中心核的温度降低,而中心核的温度降低使得氢燃烧结束的时间延长,即使主序变宽.此外,在有星风物质损失时,大质量星可以在氢或氦燃烧阶段将大部或全部外壳物质丢失掉.当恒星将其全部外壳物质丢失掉时,它在赫罗图中的演化轨迹就会反转,向温度升高的蓝方向运动,这就可以解释为什么大质量星的赫罗图中存在 HD 极限的原因.

因为恒星在演化达到 HD 极限时,已将全部外壳物质损失掉,其演化轨迹反转向蓝方向运动。

当大质量星的演化轨迹向蓝方向运动到超过主序后,就变为沃尔夫-拉叶星(这种星的内部几乎都是由氦组成),并且中心核开始氦燃烧,这以后的演化轨迹又转向右朝红方向运动。大质量星的最终结局是演变为超新星。

6 恒星演化的最后阶段

恒星的演化主要由它内部的热核燃烧所决定,恒星内部的热核燃烧可能经过如图 7 所示的演化过程。如果一颗恒星能够经历如图 7 所示的所有核燃烧过程,则它的最后演化阶段将成为超新星,并且爆炸后可能会遗留下一中子星或黑洞。如果恒星不能够经历如图 7 所示的所有核燃烧过程,仅仅在某一种核燃烧过程后便终止,则恒星最后演化阶段将是白矮星。决定恒星能否经历如图 7 所示的所有核燃烧过程的因素,主要是恒星的初始质量的大小。在上节中已经指出,初始质量小于 $8 M_{\odot}$ 的恒星最终会演化成为白矮星,初始质量大于 $8 M_{\odot}$ 的恒星极大可能会或者一定会演化成为超新星。

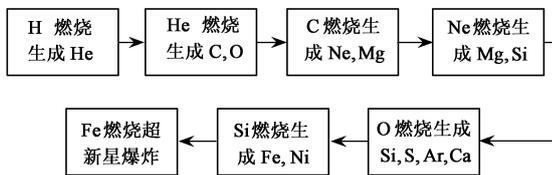


图 7 恒星中心核的热核燃烧演化示意图

6.1 白矮星

白矮星是中、小质量星最后演化阶段的产物。和通常恒星相比,白矮星有几个明显不同的特点:首先是它的体积小,半径只有太阳半径的 1%。白矮星的质量一般为 $0.2-1.4 M_{\odot}$,因此,它的平均密度很高,大约为 10^6 g cm^{-3} ,是太阳平均密度的 100 万倍。同时表面的引力势很大,比太阳的表面引力势高 100 倍,由于白矮星是中、小质量星将其外壳丢掉以后所暴露出来的简并核,因此,它内部的温度很高,呈白色。然而,由于它的体积很小,它的光度 L (即每秒由表面辐射出去的总能量)却比较小,在赫罗图中它位于主序的左下端(见图 1)。白矮星的另一重要特性是它的内部不再有热核反应,因而它的向外辐射和演化是依靠消耗自身的热能。

通过天文观测可以知道,白矮星的表面温度不

高,大约为 10^4 K ,表面的密度也很低,小于 10^2 g cm^{-3} 。由此可以知道,白矮星的外壳是由非简并的,或简并度很低的理想气体组成。通过理论计算可以知道,它的外壳很薄,其厚度仅为半径的 0.1%,即 $1-10 \text{ km}$ 。白矮星的内部,电子是完全简并的。由于简并电子具有很高的导热性,再加上白矮星的光度 L 比较小,因而白矮星内部的温度梯度必然很小,可以近似看作是等温的。所以白矮星是由一个等温的电子简并核和一个由理想气体组成的外壳所组成。

由于白矮星内已经停止了热核反应,白矮星的向外辐射完全依靠消耗自身的热能来补偿。随着热能的不断消耗,白矮星将逐渐冷却变暗。在全部热能耗尽,因而温度 $T \rightarrow 0$ 时,白矮星就变为黑矮星。所以白矮星的演化过程就是它的冷却过程。白矮星有一个由理想气体组成的外壳,有十分重要的意义。因为在这样的外壳内,能量的传递主要是由辐射和对流来完成,然而辐射和对流的传能效率远远小于内部完全简并电子的热传导。因此,有理想气体组成的外壳的存在,可以大大地降低向外的能量传递,从而十分减缓了白矮星的冷却过程,使白矮星的演化变慢。由理论计算可以知道,白矮星将全部热能耗尽而变为黑矮星所需的时间大约为 10^9 a ,这个寿命几乎可与宇宙年龄相比拟。

根据白矮星是简并星,还可以知道它具有以下性质:其一是它的质量和半径成反比,即质量越大则半径越小。这个性质和通常恒星的质量越大则半径越大的性质是相反的;其次是它的质量有个上限,即任何白矮星的质量都不能超过一个上限值。出现以上特性是因为白矮星既要满足流体静力学平衡条件,同时内部压强主要是简并电子压强所致。为了说明这点,可作如下讨论:

流体静力学平衡条件为

$$\frac{dP}{dr} = -\rho \frac{GM}{r^2}, \quad (10)$$

由于 $\rho \approx \frac{M}{R^3}$, (10) 式的右边可写成

$$\rho \frac{GM}{r^2} \approx \frac{M^2}{R^5}. \quad (11)$$

在简并星内部,气体压强主要由简并电子压强提供。当电子完全简并和电子速度低于光速时,有

$$P \propto \rho^{5/3} \approx \frac{M^{5/3}}{R^5}, \quad (12)$$

当电子完全简并和电子速度接近和等于光速时,则有

$$P \propto \rho^{4/3} \approx \frac{M^{4/3}}{R^4}, \quad (13)$$

将(12)式代入(10)式的左边,与(11)式,可得

$$M^{1/3} R = \text{常数} \quad (14)$$

即当白矮星的质量不是很大,密度不是很高时,电子速度低于光速,则质量与半径的三次方成反比,即质量越大,半径越小.

将(13)代入(10)式的左边,与(11)式,可得

$$C \frac{M^{4/3}}{R^5} = \frac{M^2}{R^5},$$

即

$$M = C^{3/2}. \quad (15)$$

即在白矮星的质量增大到一个极限质量,且密度已增大到使电子的速度接近和等于光速时,这时质量不再与半径有关,而为一常数.这就是白矮星的质量上限.由昌德拉塞卡(Chandrasekhar)理论^[31]可推导出白矮星的质量上限为 $1.44 M_{\odot}$.

6.2 超新星

超新星爆炸是恒星演化到末期发生的灾难性爆炸现象.它将使整个恒星毁灭.超新星爆炸后,一种可能是没有遗留物,整个恒星全部炸裂飞向空间,另一种则只是恒星的外壳炸裂后飞向空间,然而恒星的致密核被遗留下来,成为一颗中子星或成为黑洞.

根据超新星的光谱和光变曲线的不同,可以区分两种不同类型的超新星:I型超新星的光谱中没有氢线存在,而II型超新星的光谱中有氢线存在;超新星的光变曲线的共同特性是开始时有一个陡峭地上升,极短时间内便达到光极大,然后下降.但是I型超新星的光极大比II型超新星的光极大小一个星等,同时I型超新星在光极大以后的下降比II型超新星的下降要迅速得多.

通常认为,II型超新星是大质量恒星演化到晚期的产物.质量大于 $10 M_{\odot}$ 的恒星,中心核碳燃烧及以后的氦、氧、硅燃烧(见图7)都是在电子非简并情况下发生的.使得恒星中心核可以经历碳、氦、氧、硅燃烧而成为超新星前星.根据 Woosley 和 Weaver^[32] 对一颗 $25 M_{\odot}$ 恒星的演化计算,超新星前星的最内部是一个由铁元素(^{54}Fe , ^{56}Fe)组成的核,称为铁核.在铁核的外面有一个由 ^{16}O , ^{28}Si , ^{32}S , ^{20}Ne , ^{24}Mg 等元素组成的外罩,在外罩的外面则是以氦为主的外壳.当铁核收缩时,铁核内部的温度可以达到 $5 \times 10^9 \text{ K}$ 以上,密度达到 $\sim 10^{10} \text{ g cm}^{-3}$ 以上.当铁核内部的温度达到 $5 \times 10^9 \text{ K}$ 以上时,铁核内部的光子的能量已经超过了包括铁原子在内的所有重原子的结合能.于

是光子可以将铁核内的各种重原子核破坏,这种过程称为光致蜕变过程.当温度足够高时,铁核内各种重原子核发生光致蜕变后的产物还可以继续发生光致蜕变.光致蜕变过程是一个吸热过程.例如将一个质量为 $1.4 M_{\odot}$ 的铁核通过光致蜕变完全变为中子和质子大约需要 $1.4 \times 10^{45} \text{ J}$.

在密度高于 $1 \times 10^9 \text{ K}$ 时,铁核内还会发生电子捕获过程,即电子可以被质子捕获而形成中子和中微子.捕获电子的质子不一定必须是自由态的质子,它可以是束缚于重原子核中的质子.当铁核收缩使密度超过 $10^{11} \text{ g cm}^{-3}$ 时,所有的重原子核都可以捕获电子而形成大量的中微子.电子捕获过程也是一个吸热过程,例如使一个质量为 $1.4 M_{\odot}$ 的铁核发生电子捕获过程需要吸收 $1.6 \times 10^{45} \text{ J}$ 的能量.

当铁核收缩并使得内部的温度升高达到 $5 \times 10^9 \text{ K}$ 以上和密度达到 $\sim 10^{10} \text{ g cm}^{-3}$ 以上时,铁核内会出现光致蜕变和电子捕获两个弱相互作用过程.这两个弱相互作用过程都是非常强烈的吸热过程,造成铁核内的大量能量瞬间被吸收,这只有消耗铁核内各种粒子(主要是电子)的动能,并意味着铁核内的压强要剧烈下降.另外,铁核内的压强主要是简并电子压强,当大量电子被重原子核捕获时,必然使电子压强骤然下降.因而铁核的流体静力学平衡条件被破坏,铁核因自身的重力作用而坍缩.

铁核开始坍缩后,物质迅速向中心下落,使中心部分的密度骤然上升,压强增大,于是靠近中心部分的物质下落速度减慢,而外部区域的物质仍以接近自由落体速度的超音速下降.这样,在铁核的中心区域会出现一个内核,其物质密度可以升高到接近核密度($2.4 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$),这时核力将变得很重要,并使物质变为不可压缩,同时内核中的中子也简并了.当铁核的中心部分变为不可压缩时,中心部分的坍缩停止.然而中心部分以外的部分仍以超音速下落.这样,就在中心内核附近产生一强大的冲击波,并根据动量守恒原理,在冲击波处必然产生反弹,内核的反弹可以使冲击波向外传播.

铁核坍缩时,可以使内核的温度超过 $7 \times 10^9 \text{ K}$,密度达到 $10^{11} \sim 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$,在这样高温高密状态下,将产生强烈的光致蜕变和电子捕获过程,并产生大量的中子和中微子.

内核反弹使激波向外传播时,储存于激波内的能量(即内核的束缚能),可以瞬间直接将恒星爆炸.这就是超新星爆炸的瞬间爆炸机制.但是,这种瞬间爆炸机制还不能解释初始质量超过 $15 M_{\odot}$ 的恒星最

后成为超新星时的爆炸机制. Wilson^[33], Bethe 和 Wilson^[34]等人认为,发生反弹几百毫秒后,由于中微子传能作用,可以在距离内核较远的地方再生成一个激波,而这个延缓生成的激波向外传播时,可以将外部物质炸开.这就是超新星爆炸的延缓爆炸机制,它可以解释初始质量超过 $15 M_{\odot}$ 的恒星最后成为超新星时的爆炸机制.

I 型超新星的本质和 II 型超新星不同.根据 Nomoto 等人^[35]的研究, I 型超新星的前星是双星中的一颗 C-O 白矮星.当它吸积了伴星的物质以后,可以引发一个非稳定的爆炸式的热核反应,并且这个非稳定爆炸式的热核反应可以将整个恒星炸开,形成 I 型超新星的爆炸.

6.3 中子星

中子星是超新星爆炸后遗留下的内核.它的质量一般为太阳质量的 1.5—2.5 倍,但半径却只有 10km 左右,因而中子星内部的平均密度极高,可以达到 10^{14}gcm^{-3} 以上.和白矮星一样,在中子星内部不再存在热核反应,它的能源是靠消耗内部的热能来维持向外的辐射.

在现代天体物理的许多领域中,中子星有重要的意义.例如通过观测发现的脉冲星是快速自转的并有很强磁场的中子星,许多 X 射线源和 γ 射线源都是来自双系统中的中子星对其伴星物质的吸积而产生的.虽然中子星与许多重要的天体物理现象有关,但要深入完整地了解中子星的结构和性质是十分困难的.因为在密度达到核密度 ($2.4 \times 10^{14} \text{gcm}^{-3}$) 甚至更高的情况下,广义相对论效应变得很重要,同时在这样高密度下,强相互作用(核力)已不可忽略,而解有强相互作用的物态方程是十分困难的.因此,目前只能粗略地研究中子星内部的结构和性质.

在超新星爆炸的瞬间,中子星的温度可以高达 $10^{11} - 10^{12} \text{K}$.但由于中微子逃逸和中子星内部简并物质的超导热性,中子星的温度迅速下降,爆炸之后的第一天,温度可降到 10^9K ,而爆炸后 100 年可降到 10^8K , 10^8K 对于地球和太阳是很高的温度,但对于密度很高的中子星则是极低的温度.因为处于 10^8K 温度下的粒子热能 $kT \approx 10 \text{KeV}$,但密度为 10^{14}gcm^{-3} 的简并中子的费米能量 $E_F \approx 1000 \text{MeV}$,它比粒子热能高 10^5 倍,所以可以将中子星内部物质看作是 $T \approx 0$ 的物质.即中子星内部的简并电子、质子和中子是处于最低能态.这个事实使得造成中子消失的中子 β 衰变过程

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (16)$$

不能发生.因为要发生中子 β 衰变过程,必须是衰变产生的电子和中微子的能量达到中子与质子质量差所相应的很高能量.然而电子处于最低能态,没有这么高能量,因而可以造成中子消失的中子 β 衰变过程不能发生.

在中子星内部,因为当密度很高时,会出现电子被原子核中的质子捕获而形成中子和中微子的电子捕获过程(又称中子化过程).中子化过程将随着密度的增大而加剧.反过来使中子消失的中子 β 衰变过程却不能发生,这样必然造成中子星内部主要由中子组成.密度越大的区域中子越多.于是可以根据中子星内部不同的密度区域,讨论其化学组成:在密度低于 10^{11}gcm^{-3} 区域,由于原子核捕捉电子而形成中子较丰富的原子核,所以这个区域的物质主要是由重原子核和电子组成(见图 8);在密度达到 $4 \times 10^{11} \text{gcm}^{-3}$ 区域,含中子最丰富的原子核 $^{118} \text{Kr}$ 开始释放出中子,这个过程称为中子漏,于是这个密度区域内的物质主要由原子核、电子、质子及少量的中子组成.在这个区域内,压强仍以简并电子压强为主.

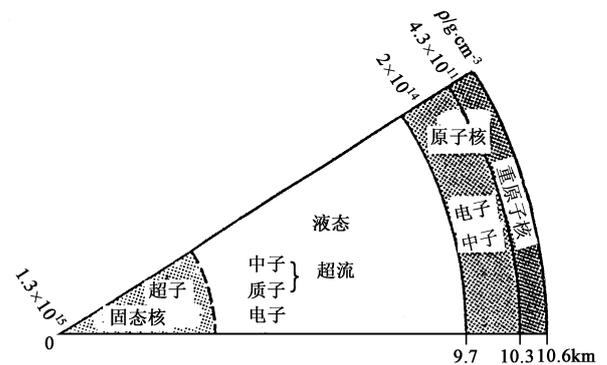


图 8 中子星内部结构示意图

中子漏过程随着密度的增大而加剧.在密度达到核密度 $2.4 \times 10^{14} \text{gcm}^{-3}$ 的区域,原子核都消失,物质主要由简并的中子(液体)和少量的电子和质子组成.在密度接近 10^{15}gcm^{-3} 区域内,由于简并电子和简并中子的能量已超过质子静止质量相应的能量,于是产生 Λ 和 Σ 超子的高能过程将会发生.因而这个区域内的物质主要由 Λ 和 Σ 超子组成.

参 考 文 献

- [1] Huang R Q, Yu K N, Stellar Astrophysics. Singapore: Springer Verlag, 1998
- [2] Schwarzschild M. Structure and Evolution of the Stars. Princeton: Princeton University Press, 1958
- [3] Kippenhahn R, Weigert A, Hofmeister E. Meth. Comp. Phys., 1967, 7: 129

- [4] Iben I Jr. *Astrophys. J.*, 1965, 141 :993
- [5] Kippenhahn R, Thomas H C. In: *Stellar Rotation*, IAU Coll. 4, ed. A. Slettebak. 1970, 20
- [6] Meynet G, Maeder A. *Astron. Astrophys.*, 1997, 321 :425
- [7] De Loore C, de Greve J P, Lamers H J G L M. *Astron. Astrophys.*, 1975, 61 :251
- [8] Chiosi C, Maeder A. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1986, 24 :329
- [9] Stothers R, Chin C. *Astrophys. J.*, 1979, 233 :267
- [10] Kippenhahn R, Weigert A. *Z. Ap.*, 1967, 65 :251
- [11] Paczynski B. *Acta Astron.*, 1967, 17 :193
- [12] Paczynski B. *Acta Astron.*, 1967, 17 :355
- [13] De Loore C. *Space Sci. Rev.*, 1980, 26 :113
- [14] Vanbeveren D. *Space Sci. Rev.*, 1991, 56 :249
- [15] Huang R Q, Tamm R E. *Astron. Astrophys.*, 1990, 230 :107
- [16] Baker N, Kippenhahn R. *Z. Ap.*, 1962, 54 :114
- [17] Cox J P. *Theory of Stellar Pulsation*. Princeton: Princeton Univ. Press, 1980
- [18] Cox A N, Starrfield S G, Kidman R B *et al.* *Astrophys. J.* 1987, 317 :303
- [19] Li Y. *Astron. Astrophys.*, 1992, 257 :133
- [20] Li Y. *Astron. Astrophys.*, 1992, 257 :145
- [21] Jeans J. *Astronomy and Cosmogony* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1928; republished 1961, New York: Dover
- [22] Iben I Jr. *Astrophys. J.*, 1965, 141 :993
- [23] Kippenhahn R, Weigert A. *Stellar Structure and Evolution*. Berlin: Springer-Verlag, 1990
- [24] Kippenhahn R, Thomas H C, Weigert A. *Z. Ap.*, 1968, 69 :265
- [25] Strom S E, Strom K M, Rood R T *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1970, 8 :243
- [26] Iben I Jr, Renzini A. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1983, 21 :271
- [27] Wood P R. In: Iben I Jr, Renzini A eds. *Physical Processes in Red Giants*. Dordrecht: Reidel, 1981. 205
- [28] Willson I A, Kowalsky P. In: Kwok S, Pottasch S R. eds. *Later Stage of Stellar Evolution*. Dordrecht: Reidel, 1987. 277
- [29] Wood P R, Vassiliadis E. In: Bergeron J ed. *Highlights of Astronomy*. Dordrecht: Reidel, 1992. 617
- [30] Jiang S Y, Huang R Q. *Astron. Astrophys.*, 1997, 317 :121
- [31] Chandrasekhar S. *An Introduction to the Study of Stellar Structure*. Chicago: Univ. of Chicago Press, 1939
- [32] Woosley S E, Weaver T A. In: J. Audouze, N. Mathieu eds. *Nucleosynthesis and Its Implications on Nuclear and Particle Physics*. Dordrecht: Reidel, 1986. 145
- [33] Wilson J R. In: Centrella J *et al* eds. *Numerical Astrophysics*. Boston: Jones and Bartlett, 1985. 422
- [34] Bethe H A, Wilson J R. *Astrophys. J.*, 1985, 295 :11
- [35] Nomoto K, Thielemann F K, Miyaji S. *Astron. Astrophys.*, 1985, 149 :239

• 物理新闻 •

强强联盟制约敌人 (Mortal Enemies Form Powerful Alliances)

布达佩斯的两位科学家 G. Szaba 和 T. Czaran 在对九种相互竞争的菌种进行生化战争模拟中发现强强联盟可以制约敌人。

这个研究起因于最近发现,当细菌在分泌毒素时会起到抑制其近亲细菌的作用。研究者们首先假定存在着三类相关的细菌,它们是:能产生毒素的杀手(K类),载有不受毒素侵害的遗传因子的抵抗者(R类)和既无毒素又无抵抗因子的精灵族(S类)。大群的S类细胞明显地受到K类的控制,但K类又受到R类的制约,因为R类在抵抗时消耗储备较少,最终S类的数量由于它不需要承担产生毒素和遗传因子的责任而不断增加。这实际上是一个在自然种群中广泛应用的“石头-剪刀-纸”游戏的生物版本。

首先让研究者惊奇的是,细菌可以产生两种不同的毒素和载有与其相应的抵抗因子,这样一来,K,R,S可以组成九种组合,即:KK, KR, KS, RS等。在某些情况下,有三种组合可以消除其他六种组合。这也是“石头-剪刀-纸”游戏的边界效应。

例如KK-RR-SS是三个稳定的组合,当RS入侵时,就与RR发生超级竞争,同时又受到KK类的攻击,而让SS类得到某种超越。这样的问题也会在其他细菌类入侵时发生,因此这种多层次的攻击保护着各类细菌联盟。

其次,研究者意外地发现,若在他们的模型中改变细菌类别间的变异率可以奇妙地影响细菌类别间的力量平衡。当变异率较小时,三个稳定联盟最终能消灭其他不结盟的菌族而保持各自的等价优势。当变异率超过临界值时,菌种间会发生频繁的变种(如KK变为KR),这时联盟被破坏,九种菌族将和平相处。所以改变菌种的变异率能引起一次相变,从一个九种菌种的混合相转变成一个相互敌对的循环联盟的稳定相。

这个简单系统的复杂性告诉我们,自然界中的人口动力学要比过去建立在掠夺与被掠夺平衡基础上的各种简单方程要丰富得多。

(云中客摘自 *Physical Review E*, June 2001)