

## 近代物理讲座

### 第八讲 恒星的形成、演化和终局

俞允强

(北京大学物理系)

同其它物体一样,恒星也有它的发生、发展和死亡的过程.只是这个过程相当缓慢.一颗类似太阳的恒星,它一旦形成,将在约  $10^{10}$  年的时间内不会有显著的变化.当然,这和人类文明史(约  $10^3$ — $10^4$  年)相比,太长了.因此人们不可能直接观测到恒星的演变.但是,他们可以对大量处于不同年龄和不同演化阶段的恒星进行观察,并对大量资料作出科学的统计分析.这方面极重要的贡献是在本世纪初由 Hertzsprung 和 Russell 作出的(见后文).另一方面,人们可以根据物质运动普遍地遵循的物理规律,用理论物理的方法来推测恒星应当如何地从一种状态向另一状态过渡,从而预言出恒星演化的全过程.这是本文讨论恒星的形成、演化和终局的主要思想线索.

今天已经清楚,决定恒星的结构和结构的演变的物理规律包括三个方面:一是力学平衡或动力学的规律;二是能量平衡的机制和规律;三是物质中能量输运的机制和规律.本世纪初,经典先驱者 Emden, Eddington 等人在研究恒星结构时,还不知道恒星长期稳定的辐射是以什么为能源的.他们仅从恒星是自引力作用下达到力学平衡的气体球的角度,去了解恒星内部的密度、温度和压力的分布.由于三十年代末核物理研究的进展. Gamow, Bethe 等人弄清了发生在星核区的热核反应是恒星辐射的主要能源.

简单说来,恒星的形成是以核心区的氢开始稳定地燃烧为标志的,而恒星的演化则是氢、氦、碳等各种轻元素的热核反应逐级发展的过程.热核反应能持续的时间很长,这正是恒星

能长时间保持不变的原因.可是,核燃烧的时间终究是有限的,核燃烧的结束标志着恒星走向死亡的阶段开始了.这时使我们感兴趣的新问题是,死亡了的恒星将以什么样的位形出现,这也就是恒星的终局问题.

1925 年证认出白矮星为冷却中的高密星体,它使人们第一次认识到了一类正在死亡中的恒星.1967 年证认出脉冲星即为中子星,这是另一类正在死亡中的恒星.如果恒星演化到最终阶段所残留的质量太大,以致不能平衡地停止在这两种位形上,那么它将由于自身的引力而无限地收缩下去,形成所谓黑洞.

#### 一、恒星的形成

恒星的形成是从弥漫物质局部地失却平衡,向自身的引力中心塌缩而开始的.在塌缩的开始阶段,稀薄气体状的弥漫物质内部的压力很微小,物质在自引力作用下加速地向中心坠落.当物质的线度收缩了几个量级后,情况就不同了.一方面,这时气体的密度有了剧烈的增加;另一方面,由于失去的引力位能部分地转化成了热能,气体的温度也有了很大的增加.气体的压力正比于它的密度与温度的乘积,因而在塌缩过程中,压力增长更快.这样,在气体内部会很快地形成一个足以与自引力相抗衡的压力场.这压力场将最后制止引力塌缩,从而建立起一个新的力学平衡的位形.通常称它为星坯.

那么星坯作为一个力学上平衡的位形,它还会不会演变?怎么演变呢?星坯的力学平衡

是靠内部压力梯度与自引力相抗衡造成的，而其压力梯度的存在却依赖于内部温度的不均匀性(即星坯中心的温度要高于外围的温度)，因此在热学上，这是一个不平衡的系统，热量将从中心逐渐地向外流出。这一热学上趋向平衡的自然倾向对力学平衡起着削弱的作用。于是，星坯必须缓慢地收缩，以其引力位能的降低来升高中心温度，从而恢复力学平衡；同时也是以引力位能的降低，来提供星坯辐射所需的能量。这就是星坯演化的主要物理机制。

联系到实际的天体，我们问，象太阳这样的恒星是否正处于这样的演化阶段呢？回答是否定的。根据是基于如下的估算。

由观测知道，太阳的质量  $M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{g}$ ，半径  $R = 7 \times 10^{10} \text{cm}$ 。它收缩到今天这个状态所已释放的总位能是

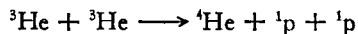
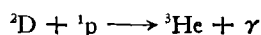
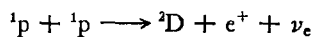
$$E_{\text{位}} = \frac{GM^2}{R} = \frac{6.7 \times 10^{-8} \times (2 \times 10^{33})^2}{7 \times 10^{10}} = 4 \times 10^{46} \text{erg.}$$

太阳的总光度  $L_{\odot} = 4 \times 10^{33} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。如果这辐射光度靠引力收缩为能源来维持，那么能维持的时间是

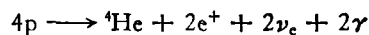
$$T = \frac{E_{\text{位}}}{L} = \frac{4 \times 10^{46}}{4 \times 10^{33}} = 10^{13} \text{s} = 3 \times 10^7 \text{yr.}$$

很多证据表明，太阳稳定地保持着今天的状态已有  $5 \times 10^9$  年了。因此，星坯阶段只能是太阳形成像今天这样的稳定状态之前的一个短暂的过渡阶段。可是这样就提出了新的问题，星坯的引力收缩是怎么会停止的？此后太阳的辐射又是以什么为能源的？

让我们先对问题作一定性的物理分析。太阳的化学成分主要是氢(占 71%)和氦(占 26.5%)。在引力收缩阶段，它的温度在逐渐升高。当温度达到  $10^4 \text{K}$  以上，即粒子的平均热动能达  $1 \text{eV}$  以上，氢原子通过热碰撞就充分地电离了(氢的电离能是  $13.6 \text{eV}$ )。在温度进一步升高后，等离子气体中氢核与氢核的碰撞就可能引起热核反应。对纯氢的高温气体，最有效的热核反应系列是所谓 p-p 链：



这反应链的净效果是



因为反应后粒子的总静质量小于反应前的静质量，所以它是一个放能的反应链。这样，一旦热核反应的放能率足以维持恒星的辐射，并能在恒星内部形成一个稳恒的温度梯度，那么引力收缩就自然停止了。

这一分析包含两个需要定量地回答的问题：1. 太阳中氢的燃烧是否足以持续  $5 \times 10^9$  年以上？2. 太阳中的温度是否足以引起氢的燃烧？

这反应链的放能百分率是

$$\frac{\Delta m}{4m_{\text{p}}} = \frac{4m_{\text{p}} - m_{\text{He}} - 2m_{\text{e}^+}}{4m_{\text{p}}} = 0.007.$$

设在点火后，太阳中有  $0.1M_{\odot}$  的氢可供燃烧，那么可供释放的总能量将有

$$(0.1M_{\odot} \times 0.007)c^2 = 1.3 \times 10^{51} \text{erg.}$$

按现在的光度来辐射，太阳能稳定维持的时间为

$$\frac{1.3 \times 10^{51} \text{erg}}{4 \times 10^{33} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}} = 3 \times 10^{17} \text{s} = 10^{10} \text{yr.}$$

也就是说，在太阳已经稳定地存在的时间内，可供燃烧的氢大约消耗了一半。

第二个问题的回答要复杂得多。为此，先来估计一下今天太阳中心的温度，这温度实际上是被力学平衡条件大体地决定了的。

力学平衡方程写作

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{GM_r \rho}{r},$$

其中  $p$  是压力， $\rho$  是密度而  $M_r$  是半径为  $r$  的球内的质量，因此又有

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho.$$

作为量级估计，用平均密度代替分布的密度：

$$\rho = \bar{\rho} = \frac{M_r}{\frac{4}{3}\pi r^3}.$$

容易解出恒星的中心压力为

$$p_c = \frac{2\pi}{3} GR^2 \rho^2 = \frac{3}{8\pi} \frac{GM}{R^4},$$

代入太阳的数据, 算出它的中心压强为  $1.5 \times 10^{15} \text{dyne} \cdot \text{cm}^{-2}$ . 再利用理想气体的物态方程:

$$p = \frac{k}{\mu} \rho T,$$

其中  $\mu$  是平均原子量,  $k$  是玻耳兹曼常数. 立即估算出太阳中心温度为  $1.3 \times 10^7 \text{K}$ . 现今模型计算给出太阳中心温度为  $1.5 \times 10^7 \text{K}$ . 看来这是一个不坏的估计. 然后的问题是,  $10^7 \text{K}$  的温度能引起氢的热核反应吗?

我们知道, 核力是短程力, 它的力程大约是  $10^{-13} \text{cm}$ , 而核与核之间的库仑斥力是长程力. 热核反应就是要利用热运动的动能来克服库仑斥力位能, 使核与核能够相互接近到核力起作用的距离, 以引起核反应. 如果要求靠氢核的平均热平动能使两个核能接近到  $10^{-13} \text{cm}$  的距离, 那么温度  $T$  必须满足

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} kT &= \frac{e^2}{r} = \frac{(4.8 \times 10^{-10})^2}{10^{-13}} \\ &= 2 \times 10^{-9} \text{erg}. \end{aligned}$$

这相当于要求  $T = 10^{10} \text{K}$ ! 这个数值比太阳中心的实际温度高得太多了. 或者反过来讲, 在  $10^7 \text{K}$  的温度下, 几乎没有氢核能“越过”库仑位垒而逼近到核力的力程之内. 这样, 氢燃烧怎么发生呢? 三十年代末, Gamow 首先弄清了这个问题, 指出热核反应的发生不是靠“越过”位垒, 而是靠“穿透”位垒.

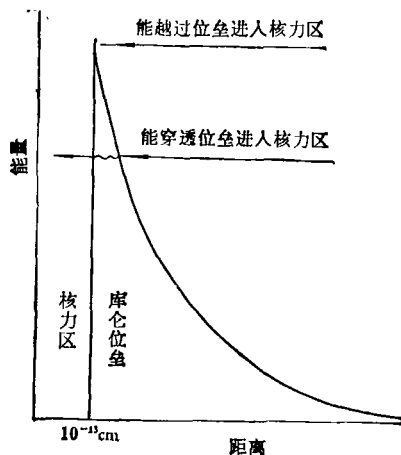


图1 库仑位垒的穿透

按照量子力学, 微观粒子有一定的几率能够通过较窄的位能高于动能的区域, 这叫做位垒穿透(图1). 库仑位垒的穿透几率正比于  $\exp\left(-\frac{2\pi e^2}{\hbar v}\right)$ . 速度小的粒子穿过去去的几率急剧减小, 因为它需要穿过更宽的位垒. 另一方面, 根据速度的麦克斯韦分布, 一定温度下气体中速度为  $v$  的粒子数正比于  $\exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$ , 可知粒子数随  $v$  的增加而急剧减少. 结合这两方面因素, 便有

$$\begin{aligned} &\text{热速度为 } v \text{ 的氢核对热核} \\ &\text{反应的贡献} \propto \exp\left\{-\left(\frac{mv^2}{2kT} + \frac{2\pi e^2}{\hbar v}\right)\right\}. \end{aligned}$$

容易算出, 一定温度下,  $v = \left(\frac{2\pi e^2 kT}{m\hbar}\right)^{1/3}$  附近的粒子起着主要作用. 速度过大的粒子由于数目太少而完全不重要. 速度过小的粒子由于穿透几率太小也完全不重要. 中间那个贡献最为重要的速度小间隔被称作 Gamow 窗口(图2).

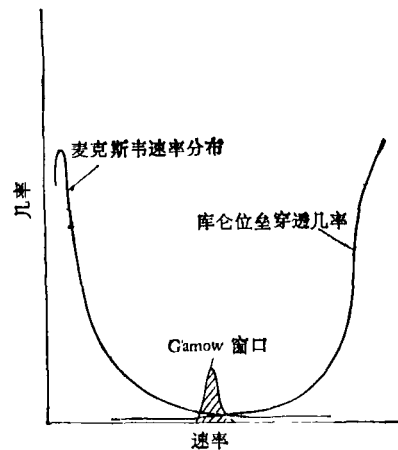


图2 Gamow 窗口

利用这样的反应机制和有关核反应截面的知识, 就可以算出某一温度下通过某一核反应而释放的能量(功率). 为了要求热核反应能够稳恒地进行, 热核反应释放的能量必须与以各种方式逸出的能量相平衡. 这样, 核燃烧区才会有恒定的温度. 这个温度叫点火温度. 并不意外的是, 人们对高温氢气计算 p-p 链的点火温度, 得到的正是  $10^7 \text{K}$ , 与太阳中心的温度是一

致的。

总之，恒星的形成过程可以粗略地被分为两个阶段。第一阶段是气体云通过引力塌缩形成星坯，这主要是动力学的过程。所形成的星坯是力学平衡的系统，但不是一个稳恒的系统。第二阶段是星坯的引力收缩。收缩使中心温度升高。一旦中心温度升高到氢的点火温度，核心区的热核反应达到了自持的程度，这才形成了一颗恒星。

## 二、H-R 图和主序星

上面以太阳为例对恒星的形成所作的分析是有普遍意义的。太阳是一大类所谓主序星的一个典型。恒星的演化总是从主序星开始的。

主序星的概念来自 H-R 图。1911 年丹麦天文学家 Hertzsprung 对某一星团中的恒星画了一个视星等与颜色的关系图。1913 年美国天文学家 Russell 用太阳邻近的恒星的绝对星等画了一个类似的图。这样的图因此得名 H-R 图。现今在理论上讨论恒星演化时，通常把 H-R 图画作是恒星光度与有效表面温度的关系(图 3)。这样，每一恒星在图上有一代表点。理论上算出它的演化进程，可表示成 H-R 图上的一条轨迹。这轨迹反映演化时恒星光度和表面温度的变化。同时，也反映了恒星半径的变化，因为恒星的光度、半径和表面温度<sup>1)</sup>是由公式  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$  联系着的。

当利用大量恒星的观测资料画这种统计图时，人们发现，百分之八十至九十的恒星在图上处于对角位置的一条带上。因此这条带被称作恒星的主序列。处于带上的星叫做主序星。我们的恒星——太阳的代表点也正处在主序列之中。对主序星讲，较亮的星具有较高的表面温度，呈现出颜色较蓝；而较暗的星具有较低的表面温度，呈现出较红的颜色。现在已经弄清，主序星是内部有氢在燃烧的恒星，亦即它是处于演化第一阶段上的恒星。

除主序星之外，还有一些恒星分布在 H-R 图的其它区域里。它们是处于各个更高演化阶

段上的恒星，其中较主要的有下列几类(图 3)。

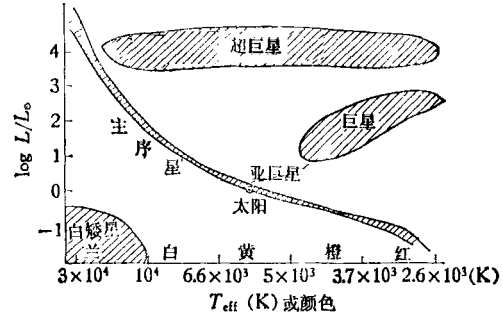


图 3 恒星 H-R 图上的分布示意

巨星：它位于主序列的右上方。巨星的光度大约在零等上下。它们的颜色比同光度的主序星要红，半径要更大。因此也叫红巨星。

亚巨星：它处于主序列与红巨星区之间。

超巨星：它在 H-R 图上是一条水平的带。它们的光度高达  $10^4 L_{\odot}$ ，半径很大，各种颜色都有。

白矮星：它处于 H-R 图的左下部。因密度很大，半径很小，所以光度也小。表面温度很高，颜色呈白或蓝。

这里我们对主序星作一些讨论。如前所述，各个主序星的共同特征是它们的星核区都有氢正在燃烧。那么它们光度、半径和表面温度的不同是什么造成的？让我们从演化的角度来看。设想一大块弥漫物质，它忽然碎裂成许多质量大小不等的碎片。这些碎片必将按上节描述的过程各自演化成质量不同的主序星。如果这块弥漫物质有确定的和均匀的化学成分，那么决定它们在演化中物理参量不同的根本原因仅在于它们有不同的初始质量。不同质量的碎片将在收缩到不同半径时达到点火温度，从而有不同的光度和不同的表面温度。因此它们在 H-R 图上的代表点应当形成一条光滑曲线。这就对应统计分布上所看到的主序列。实际上，不同恒星的化学成分有些区别，另外在氢燃烧过程中恒星的光度和表面温度也还会有小的变化，所以看到的主序列不是一条线，而是

1) 恒星的表面温度有许多不同的定义，因而数值也有所不同。

带状的。主序星的定量上的差别主要是质量不同,其次是它们的年龄和化学成分。

观察到的主序星的最小质量大约为  $0.1M_{\odot}$ 。模型计算表明,当质量小于  $0.08M_{\odot}$  时,星体的收缩将达不到氢的点火温度,从而形不成主序星。这就是说,主序列在下方应当是有端点的。质量越大的主序星越处于上方,表现出有越大的亮度。观察到的主序星的最大质量大约是几十个太阳质量,理论上讲,质量太大的恒星辐射很强,内部的能量过程很剧烈,因此结构也越不稳定。但是理论上没有一个质量的绝对上限。

当对某一星团作统计分析时,人们却发现主序列有一个上端。这说明什么?我们已经知道,主序星的光度应是质量的函数。这函数可分段地用幂式表示:

$$L \propto M^{\nu},$$

其中  $\nu$  不是一个常数,它的值大概在 3.5 到 4 之间。 $M$  大反映主序星中可供燃烧的物质多,而  $L$  大反映燃烧得快。因此主序星的寿命可近似地用  $M$  与  $L$  的商来标志:

$$T \propto M^{-(\nu-1)},$$

即主序寿命随质量增大而按幂律减小。如果整个星团已存在的年龄为  $T$ ,那就可以由  $T$  与  $M$  的关系式求出一个截止质量  $M_T$ 。质量大于  $M_T$  的主序星已结束核心的氢燃烧阶段而离开了主序列。这就是观察到由大量同龄恒星组成的星团的主序列有上端的原因。

现在我们讨论观测到的恒星中绝大部分是主序星的原因。表 1 根据一个  $25M_{\odot}$  的恒星演化模型,列出了各种元素的点火温度及燃烧所持续的时间。从表上看出,原子序数大的核有更高的点火温度,这是由于核间的库仑位垒随  $Z$  加大而增高并增宽的缘故。 $Z$  大的核不仅难于点火,点火后燃烧也更剧烈,因此燃烧的持续时间也就更短。这颗  $25M_{\odot}$  的模型星的核燃烧阶段的总寿命为  $7.5 \times 10^6$  年,而其中百分之九十以上的时间是氢燃烧阶段,亦即是主序阶段。从统计的角度讲,这表明找到一颗处于主序阶段的恒星的几率远比找到一颗处于更高演

化阶段的恒星的几率要大。这正是观察到的恒星大多数为主序星的基本原因。

表 1  $25M_{\odot}$  恒星的演化模型

燃烧阶段	点火温度 (K)	中心密度 ( $\text{gcm}^{-3}$ )	持续时间 (yr)
H	$4 \times 10^7$	4	$7 \times 10^6$
He	$2 \times 10^8$	$6 \times 10^2$	$5 \times 10^5$
C	$7 \times 10^8$	$6 \times 10^3$	$5 \times 10^4$
Ne	$1.5 \times 10^9$	$4 \times 10^6$	1
O	$2 \times 10^9$	$1 \times 10^7$	$5 \times 10^{-2}$
Si	$3.5 \times 10^9$	$1 \times 10^8$	$3 \times 10^{-3}$
核燃烧阶段总寿命			$7.5 \times 10^6$

初始化学成分: 氢 93%, 氦 6%, 其他 1%。

### 三、主序后的演化

由于恒星形成时它的主要成分是氢,而氢的点火温度又比其它元素都低,所以恒星演化的第一阶段总是氢的燃烧阶段,即主序阶段。在主序阶段恒星内部维持着稳恒的压力分布和温度分布,所以在整个漫长的阶段,它的光度和表面温度都只有很小的变化。下面我们讨论,当星核区的氢燃烧完毕后,恒星又将怎么进一步演变。引言中已提到,决定恒星演化的机制是综合的。这决定了我们下面的讨论将主要是描述性的。

首先我们以  $1M_{\odot}$  的恒星为例来讨论它的演化过程。

恒星在燃尽核心区的氢之后,就熄火,这时它的物质构成如图 4(b) 所示。核心区主要是氦,它是氢燃烧的产物。外围区的物质仍主要是未经燃烧的氢。核熄火之后,恒星失去了辐射的能量,它便要引力收缩。对于核燃烧从一个阶段向另一个阶段过渡,引力收缩是一个起关键作用的因素。一个核燃烧阶段的结束,表明恒星内各处的温度都已低于在该处引起核点火所需要的温度。引力收缩将使恒星内各处的温度全面地升高,这实际上是在寻找下一次核点火的可能性。回到太阳的演化问题上,可以想到,主序后的引力收缩所首先点着的不是核心

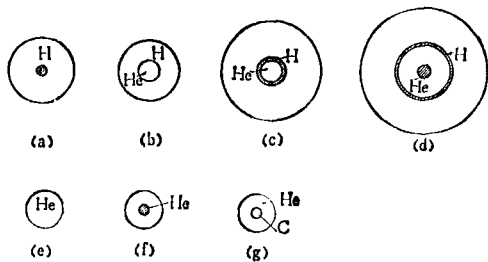


图4 太阳演化各阶段的示意(带斜线的是正在燃烧的区域)  
 (a) 主序; (b) 主序结束; (c) 氢壳燃烧; (d) 氦闪光;  
 (e) 闪光后; (f) 氦正常点燃; (g) 核熄火后

区的氦(它的点火温度高得太多),而是核心与外围之间的氢壳[图4(c)].因此第二个阶段是氢壳的燃烧阶段.氢壳点火后,核心区处于高温状态而仍没有核能源,它将继续收缩.这时,由于核心区释放的引力位能和燃烧中的氢壳所释放的核能,都需要通过外围不燃烧的氢层向外输运,为使这些能量可能输运出去,外围的氢层必须剧烈地膨胀,即让介质对辐射变得更透明.而氢层的膨胀又使恒星的表面温度降低了.这一阶段中恒星在 H-R 图上的代表点的移动如图5所示.总的讲,是一个光度增加,半径增加而表面变冷的过程.这过程使恒星从主序星向红巨星过渡.过程进行到一定程度,氦区中心的温度将达到氦点火的温度,于是就又过渡到了一个新的阶段——氦燃烧阶段[图4(d)].

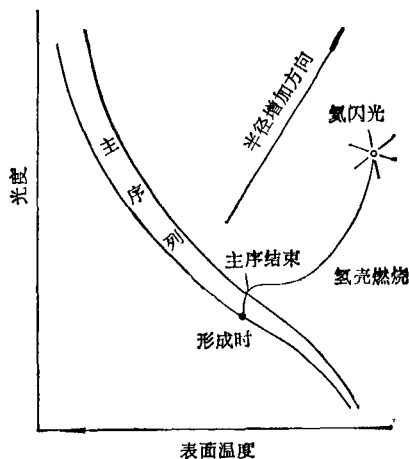


图5 H-R 图上的太阳演化轨迹

这里必须注意一点.在太阳中心发生氦点火前,引力收缩已使它的中心密度达到了

物理

$10^3 \text{gcm}^{-3}$  的量级.即气体已从普通的理想气体过渡到了电子气简并的气体.核点火发生在简并气体中与发生在不简并气体中是很不一样的.简并气体的压力对温度的依赖很弱.高度简并气体的压力几乎与温度无关而仅依赖于密度.这样,当在简并气体中发生核点火时,核反应释放的能量将使温度升高,而温度升高又反过来加剧了核反应的速率.于是核一旦点火,很快就会燃烧得十分剧烈,以至爆炸.爆炸削弱气体的密度,核反应的速率又急骤下降,甚至熄火.这种方式的点火称为“闪光”,因为在现象上会看到恒星光度突然上升到很大,后又很快地降到很低.非简并气体中的核点火就完全不是这样.因为非简并气体的压力是正比于温度的,点火后温度的升高导致压力升高,核燃烧区就会有所膨胀,而膨胀导致温度降低,因此核燃烧就能稳定地进行.正因为这两种点火情况对演化进程的影响是非常的不同,我们在这里插入一个高温简并气体条件的讨论.

所谓简并,就是气体中的粒子遵循费米-狄喇克分布:

$$W = \frac{\omega_1}{e^{\alpha + \beta E_1} + 1},$$

其中  $\beta = \frac{1}{kT}$  是温度参量,  $E_1$  是能级,  $\omega_1$  是该能级的态数,  $\alpha$  是由粒子数密度和温度决定的常数.当  $e^\alpha \gg 1$  时,上述分布回复到玻耳兹曼分布:

$$W = \omega_1 e^{-\alpha - \beta E_1}.$$

这样的气体就叫非简并的.因此  $e^\alpha = 1$  可当作是简并与非简并的界限.  $\alpha$  与粒子数密度  $n$  及温度  $T$  的关系可由统计力学得出.近似地有

$$e^\alpha = \frac{(2\pi mkT)^{3/2}}{nh^3}.$$

$$\frac{(2\pi mkT)^{3/2}}{nh^3} = 1,$$

其中  $m$  是粒子的质量.在等离子气体中,电子质量比原子核小得多,所以其中的电子组分较容易由于密度增大而呈现简并.

运用这条件到核点火问题上来.氦点火的温度约为  $2 \times 10^8 \text{K}$ .在这温度下,电子气为简

并的条件是  $n \geq 3 \times 10^{26} \text{cm}^{-3}$ . 这相当于要求氦等离子体的密度达到  $10^3 \text{gcm}^{-3}$  或以上. 这正好是类似于太阳的恒星在实现氦点火时的实际密度. 模型计算表明, 对于  $M < 2.25M_{\odot}$  的恒星, 氦点火是在电子气为简并的情况下发生的, 因而氦点火表现为“氦闪光”. 对于  $M > 2.25M_{\odot}$  的恒星, 氦点火是在非简并的情况下发生的, 因此氦燃烧是稳恒地进行的.

太阳在发生“氦闪光”之后又怎么演变? 闪光时大量能量的释放很可能把恒星球外的氢气都吹走了, 剩下的是氦的核心区 [图 4(e)]. 氦核心区因膨胀而减小了密度, 以后氦就可能在其中中心正常地燃烧了 [图 4(f)]. 氦燃烧的产物是碳, 在氦熄火后, 恒星将有一个碳核心区和氦外壳 [图 4(g)]. 由于剩下的质量太小, 引力收缩已不能达到碳的点火温度. 于是它就结束以核燃烧为特征的演化, 而走向热死亡.

上面描述的  $1M_{\odot}$  的恒星的演化进程有助于我们了解各种不同质量的恒星的演化. 但是, 不同质量的恒星在演化上是有差别的.

$M < 0.08M_{\odot}$  的情形: 氢不能点火. 它将没有核燃烧阶段而直接走向热死亡.

$0.08 < M < 0.35M_{\odot}$  的恒星: 氢能点火. 氢熄火后, 氦核心区将达不到点火温度, 从而结束核燃烧阶段.

$0.35 < M < 2.25M_{\odot}$  的恒星: 它的主要特征是氦会在简并条件下点火而出现“氦闪光”.

$2.25 < M < 4M_{\odot} (?)$  的恒星: 氢熄火后, 氦能正常地燃烧, 但氢熄火后, 碳将达不到点火温度.

$4(?) < M < 8-10M_{\odot}$  的恒星: 这是一个情况比较不清楚的范围. 或许碳仍不能点火, 或许会出现“碳闪光”, 或许碳能正常地燃烧. 因为这时最后的中心温度已较高, 一些较敏感的因素如中微子的能量损失等把情况弄模糊了.

$8-10M_{\odot} < M$  的恒星: 氢、氦、碳、氧、氖、硅等都能逐级正常地燃烧. 最后在中心形成一个不能再释放能量的铁核心区. 核心区外面是

各种能燃烧而未烧尽的轻元素的壳层. 核燃烧阶段结束时, 整个恒星呈现由内至外分层 (Fe, Si, Mg, Ne, O, C, He, H) 结构.

#### 四、恒星的终局

现在我们已知道, 对质量小于  $8-10M_{\odot}$  的恒星, 它会因为不能达到下一级的核点火温度而结束它的核燃烧阶段; 对于质量更大的恒星, 它将在核心区耗尽核燃料之后结束它的核燃烧阶段. 在这以后, 恒星的最终归宿是什么?

一旦停止了核燃烧, 恒星必定又要发生引力收缩, 这是因为恒星内部维持力学平衡的压力是与它的温度相联系的. 因此, 如果恒星存在一个“最终”的平衡位形, 它必须是一个“冷的”平衡位形, 即它的压力是与温度无关的. 这样, 首先要从物理学的角度弄清楚的问题是, 各种不同质量的物质球可能存在冷平衡位形有几类, 每一种位形内部的平衡是靠什么维持的, 以及这种位形能承受的最大质量是什么.

对于质量很小的物质球, 由于质量小, 物体内部的自引力并不重要. 固体内部的平衡是正、负粒子间的净库仑引力与电子间的简并压力, 即由于泡利原理而产生的等效斥力之间的平衡. 这种平衡位形的密度可如下地估计出. 设固体的核子数密度为  $n$ . 在量级上, 每一核子的平均库仑位能为  $-e^2 n^{1/3}$ ; 由泡利原理引起的粒子平均动能为  $m_e^{-1} n^{2/3}$  (这儿用的单位制是  $c = \hbar = G = 1$ ). 平衡的位形应使总能量取极小, 从而得出平衡态下

$$n^{1/3} \sim m_e e^2,$$

$\sim$  表示两边量级上相等. 因为物质密度  $\rho \sim m_p n$ , 于是估计出固体密度为

$$\rho \sim e^6 m_e^3 m_p.$$

换回 CGS 单位制,  $\rho \sim 10 \text{gcm}^{-3}$ . 对重原子的固液体, 这是一个很好的近似. 因此, 对于讨论恒星或行星的终态, 它是合适的.

设想逐渐加大这个物质球的质量, 看它的位形会发生什么变化. 首先的变化发生在质量大到使自引力不可忽略的时候. 这时物质的自

引力加大了内部的密度和压力。压力的加大使物质发生压力电离，从而逐渐使固体的电约束瓦解，而过渡为等离子气体。再加大质量，即加大密度，等离子气体中的电子气变为简并。这样新的平衡位形便是物质自引力与简并电子气的压力之间的平衡。由于简并气体的压力与温度无关，这也是一种“冷的”平衡位形。

估算一下冷平衡下的等离子体球的密度。简并电子气的压力为

$$P \sim m_e^{-1} n^{5/3} \sim m_e^{-1} m_p^{-5/3} \rho^{5/3},$$

物质的自引力为

$$F \sim \rho M R^{-2} \sim \rho^{5/3} M^{1/3},$$

其中  $M$  是物质的总质量。让压力梯度  $P/R$  与引力  $F$  相平衡，得出

$$\rho \sim m_e^3 m_p^3 M^2.$$

这位形的密度与总质量有关。若把这个密度公式与固体球的密度公式等起来，我们就可以估计出固体球转化为等离子体球的临界质量：

$$M \sim e^3 m_p^{-2}$$

在 CGS 单位制中，这质量是  $10^{30}$  g，即千分之一的太阳质量。在量级上也正是木星的质量。

那么简并电子气的压力最多能承受多大质量的物质球的自引力？随着质量的加大，等离子气体球的密度将加大，从而简并电子的平均速度亦将加大而过渡为相对论性的电子气体。相对论性的简并电子气的压强公式为

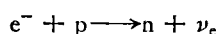
$$P \sim n^{4/3} \sim m_p^{-4/3} \rho^{4/3}.$$

让这气体的压力梯度与自引力相抗衡，我们立即得出

$$M \sim m_p^{-2}.$$

这个质量极限通常称为 Chandrasekhar 极限。它的数值约相当于一个太阳质量。再加大物质球的质量会发生什么？

实际上当质量尚未达到 Chandrasekhar 极限时，等离子体内电子的费米动能已高到足以在物质内部引起反  $\beta$  衰变：



这里的  $p$  是原子核中的质子。这样的反应大致开始发生在密度达到  $10^8 \text{gcm}^{-3}$  的时候。它将逐渐地使等离子体中的原子核由普通的核变为

富中子核。原子核中出现过多的中子，导致核结构的松散。当密度超过  $4 \times 10^{11} \text{gcm}^{-3}$  时，中子开始从原子核中分离出来，成为自由中子。当密度达到  $4 \times 10^{14} \text{gcm}^{-3}$  时，物质中的原子核将大部瓦解，形成自由中子气体（当然还会残留少量的质子和电子）。因此作为一个平衡的位形，这时内部的压力主要来自简并的中子气体而不再是简并的电子气体了。用和上面同样的方法估算出，中子气体能承受的最大质量也是一个太阳质量的量级。考虑到中子间的强相互作用，算出的极限质量值大致是  $2-3M_\odot$ ，即比 Chandrasekhar 极限约大一倍。平衡的中子气体球的密度大约是  $10^{15} \text{gcm}^{-3}$  的量级。它比正常的原子核的密度还要大一些。

物质球的质量再大时，中子气体的简并压力已不可能抵御物质的自引力，因此物质球必须继续收缩。广义相对论预言，当质量为  $M$  的物体收缩到半径小于引力半径  $R = 2M$  时，它将成为一个黑洞。黑洞是一个无限地收缩的物体，可是在引力半径内发生的过程将对外部世界不发生影响。这样的位形大概就应该是质量大于中子气体能承受的物体球的最终归宿了。

归纳起来，能够孤立地长期存在的冷平衡位形有三类：第一是固体球，它的最大质量约是千分之一的太阳质量；第二是等离子体球，它的最大质量是略大于一个太阳质量；第三是中子气体球，它的最大质量大约是二至三个太阳质量。若质量更大，它将不可能存在冷平衡的位形，因而必将演化为一个黑洞。

最后一类冷平衡位形的临界质量是如此的小，似乎给人以暗示，绝大多数恒星演化的终局都将归宿为黑洞。实际上却并不是这样，因为大多数恒星演化到最后阶段时的质量将远小于它的初始质量。恒星在演化的进程中，通过很多方式抛出它的质量，例如恒星风、“氢闪光”、超新星爆发等。它们会使恒星丢失一个很大百分比的质量。因此，恒星的终局并不是可以凭它的初始质量来判断的，它实际上取决于演化的进程。

(下转第 476 页)



功,并在生产上得到使用,获得了明显的经济效益,在现场鉴定会上得到好评。1979年年底,此项目被评为河北省科技成果三等奖。1982年中央电视台对此项目作了介绍。1983年中国同位素公司成立时,把此作为推广放射性同位素应用的一个例子。红外测水仪也基本制成。

在实践中我们有以下几点体会:

1. 物理学人才在“不对口”的工厂中也能发挥作用。

我们对造纸工业原来是一无所知的,但是我们这些学物理出身的人比较熟悉各类信号互相转换时所发生的各种效应,能较好地了解和掌握工业生产中所必须使用的器材和实验技术,而这些知识恰恰是工程技术人员所比较缺乏的。例如,那时我们到天津造纸研究所参观访问时,一位老工程师对我们说,他们对造纸工艺各个流程十分熟悉,但对各种物理量的测量、控制与转换则不太清楚。所以,对于纸张厚度和水分就只能一直沿用天平称重这种古老的方法来判断。

又如对于纸张中水分的测量,当时有关领导机关的规划是先用电导法后用微波法来测量。由于前者属接触式测量,它对纸张的连续生产是不适用的;后者由于原料、环境变化对其影响较大,因而可靠性较差。我们从国外有关杂志上查到,先进国家已在七十年代起改用红外测水方法。物理知识使我们确信这种红外测水方法的优越性。

在高、精、尖的工业中,愈来愈多地要应用近代物理的原理和技术。这样就会使物理人才在现代工业生产中发挥愈来愈重要的作用。

2. 要使物理人才在工业生产中充分发挥作用,需要有工厂领导和工程技术人员的关心与支持。

我们在某一造纸厂工作期间能取得一些成绩,首先要归功于厂领导的远见卓识和工程技术人员、工人密切合作。为了工作方便,厂内专门成立了一个领导班子。在经费上也敢于投资。例如,为了试制大剂量 $\beta$ 放射源  $\text{Pm}^{147}$ (该原料取自反应堆裂变产物的废液),厂方投资了10万元的试制费,从而使试制工作能顺利进行,很快完成了任务。通过这种放射源的出售,厂方也很快收回了投资的费用。

3. 要有社会上各行业的协作。

利用物理学中的各种现象来进行技术革新时,总要用到各种类型的新材料和器件,这在市场上常常是买不到的,因而需要有社会上各行业的协作,例如,放射性同位素测厚仪中使用的大剂量 $\beta$ 放射源  $\text{Pm}^{147}$ 的试制工作就是由北京大学技术物理系放射化学专业的几位同志承担的。这种协作也给学校带来了好处,既可取得一些实验经费,也为当时学生学习制作大剂量 $\beta$ 放射源提供了机会。测水仪中使用的多层膜干涉滤光片也是请外单位协作加工的,这就大大加速了工作的进程。

4. 要使物理专业的师生有机会到大工业系统去参观、实习。

如果能使物理专业的师生树立起为工、农业生产服务的光荣感和责任感,就会促使有更多的师生从工农业实践中寻找物理学的研究课题和毕业论文课题,从而为国家的工农业现代化多作贡献。



(上接第493页)

关于恒星演化的实际终局,大体上可以得出这样的结论:  $8-10 M_{\odot}$ 以下的恒星最终将抛掉它的一部分或大部分质量而变成一个白矮星;  $8-10 M_{\odot}$ 以上的恒星最终将通过星核的

引力塌缩而变成中子星或者黑洞。关于白矮星和中子星,请读者参阅本讲座的下一讲。

(因篇幅限制,编辑部对本文作了删节。)