

恒星身世案 循迹赫罗图

卞毓麟

(上海科技教育出版社 200235)

在 20 世纪天文学中，有两幅至为重要的图：赫罗图和哈勃图。前者是揭开恒星身世之谜的钥匙，后者则是宇宙膨胀乃至大爆炸理论的首要观测证据。今年适逢赫罗图百年诞辰，谨撰此文，以资纪念。

孕育中的恒星

万物皆有诞生、成长、衰老和死亡的过程，恒星也不例外。那么，一颗恒星究竟如何度过其一生呢？

一颗像太阳这样的恒星，从孕育到长成大致可分 7 个阶段，从成年到老死也可分为 7 个阶段。现在我们就来从头说起。

第 1 阶段——星际云 太空中有着许许多多远比今日之太阳系大得多的星际云。它们由非常稀薄的气体和尘埃组成，最主要的成分是最简单的化学元素——氢。星际云自身的万有引力驱使其气体和尘埃不断收缩，并分裂成较小的碎块。恒星形成过程的“马拉松”即由此起跑。

第 2 阶段——星际云的碎块坍缩 坍缩中的碎块体积变得越来越小，密度越来越大，随着坍缩物质的位能不断转化为动能，其内部温度也不断地升高。

第 3 阶段——碎块进一步碎裂和坍缩 越来越热、物质越来越稠密的星际云碎块可能会继续碎裂。而当碎裂过程终止时，质量堪与太阳相比的那些碎块未来将会形成恒星。

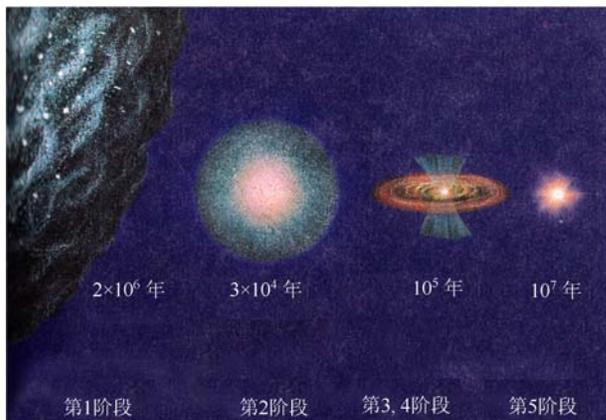


图 1 星际云的演化

第 4 阶段——原恒星形成 星际云碎块坍缩成一个明亮而温暖、主要发射红外辐射的天体，称为“原恒星”，但还算不上一颗真正的恒星。

再往后的进程，就可以用恒星在赫罗图上的“演化程”来清晰地阐述了。而欲知赫罗图的奥秘，尚须先熟悉恒星的光谱分类。

恒星光谱分类

1814 年，德国光学家约瑟夫·冯·夫琅禾费 (Joseph von Fraunhofer) 用自己发明的分光镜，发现太阳光谱里有许多垂直的光谱线，“它们比背景的颜色暗一些，有些谱线差不多是完全暗黑的”。他发表的太阳光谱图中，强弱宽窄各不相同的暗线多达 500 余条，世称“夫琅禾费线”。它们在光谱中的相对位置是固定不变的。夫琅禾费分别用大写字母 A、B、C、……，或小写字母 a、b、c、……来标记它们，这些记号一直沿用至今。

人们相信，分类法“可能是发现世界秩序的最简单的方法”。正如生物学家对五花八门的物种进行卓有成效的分类一样，天文学家也对大量恒星的光谱予以分类。意大利天文学家彼得罗·安杰洛·塞奇 (Pietro Angelo Secchi) 是恒星光谱分类工作的重要先驱者。他于 1868 年发表的分类体系将恒星光谱分成四大类。第一类的光谱中只有极少几条光谱线；第二类的光谱与太阳光谱很相似；第三类的光谱中出现明暗相间的宽阔光谱带，它们向着光谱的红端逐渐减弱；第四类的光谱特征与第三类正好相反，光谱带朝向光谱紫端逐渐减弱。塞奇生前共对 4000 余颗恒星的光谱作了分类，包括北半球肉眼可见的大多数恒星。

1890 年，美国哈佛天文台台长爱德华·查尔斯·皮克林 (Edward Charles Pickering) 领导的团队正式采用从 A 到 Q (除去 J) 的 16 个字母来表示不同的光

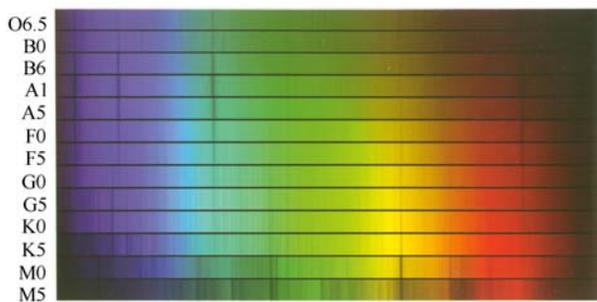
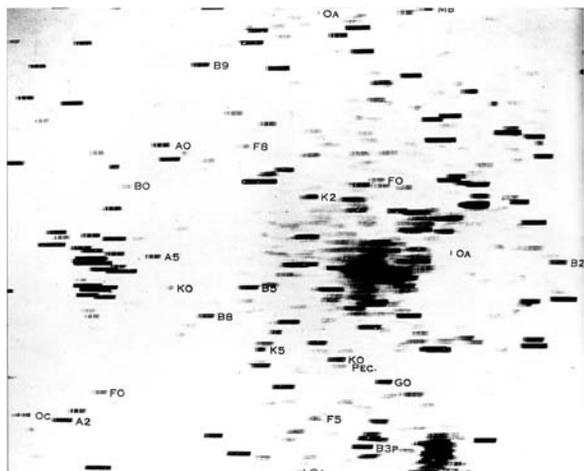


图2 不同类型的恒星光谱

谱类型。对数以万计的恒星光谱逐一分类，由皮克林麾下的女杰安妮·江普·坎农（Annie Jump Cannon）奋力完成。坎农进一步改善了分类法，削减了类别数目，调整了主要光谱类型的顺序，按恒星表面温度由高而低排列形成了如下的序列：O、B、A、F、G、K、M。

有人为便于记忆，编了一句有趣的顺口溜：Oh! Be A Fair Girl, Kiss Me! 其中每个词的首字母恰与上述光谱型序列相同。坎农还将每个光谱型划分成光谱特征连续变化的10个次型，例如从B型过渡到A型便有B0、B1、B2、……、B9。这就是非常有名的“哈佛分类法”，如今依然在广泛地应用。

坎农的工作导致了《亨利·德雷珀星表》（简称《HD星表》）及其补编（简称《HDE星表》）的诞生，它们包含了20余万颗恒星的光谱分类。皮克林去世后，坎农在新台长哈罗·沙普利（Harlow Shapley）领导下继续奋战。这位几乎全聋的女性于1941年寿终正寝，生前共对近40万颗恒星的光谱一一分类。她是美国首位享有世界声誉的女天文学家。



(a)

颜色和温度

恒星的亮暗大小彼此不同，颜色也各有差异：心宿二（即天蝎座 α ）是红色的，参宿七（即猎户座 β ）是蓝白色的……

恒星颜色的不同，缘于它们具有不同的表面温度，分析恒星光谱有助于洞察颜色与表面温度的关系。蓝白星的表面温度很高，大约是25000~40000 K；白星的温度比蓝白星低一些；红橙星的温度则比黄星和黄白星低；红星的表面温度更低，只有二三千 K。20世纪中后期，还发现了不少以辐射红外线为主、表面温度更低的红外星。表1列出一些著名恒星的颜色和表面温度：

表1 一些恒星的颜色和表面温度

| 星名 | 颜色 | 表面温度 (K) |
|---------|----|----------|
| 某些高温星 | 蓝 | 30000 |
| 参宿七 | 蓝白 | 12000 |
| 织女星、天狼星 | 蓝白 | 10000 |
| 牛郎星 | 白 | 8000 |
| 老人星 | 白 | 7500 |
| 北极星 | 黄白 | 6800 |
| 太阳 | 黄 | 5800 |
| 五车二 | 黄 | 5200 |
| 大角星 | 橙 | 4400 |
| 心宿二、参宿四 | 红 | 3600 |

测出一颗恒星光谱在不同波长处的辐射能量分布，再和不同温度的标准物体——黑体的光谱能量分布进行比较，就可以确定恒星表面的分光光度温度了。

亮度和光度

在无月的晴夜，在不受人为光源干扰的地方，常人肉眼可见的恒星共有6000多颗。公元前2世纪，



(b)

图3 (a) 哈佛天文台的物镜棱镜恒星光谱底片示例，(b) 美国女天文学家坎农毕生奉献给了恒星光谱分类

古希腊天文学家依巴谷将肉眼可见的恒星的亮度分成6个等级，称为“星等”：1等星最亮，全天有20来颗；人眼勉强能看见的是6等星。1等星的平均亮度约为6等星的100倍。

现代计量恒星亮度的方法已大为改进。1856年，英国天文学家诺曼·罗伯特·普森（Norman Robert Pogson）确立了星等和亮度之间的关系：若 m_1 和 m_2 分别代表恒星1和恒星2的星等， E_1 和 E_2 分别代表它们的亮度，则有 $m_2 - m_1 = -2.5 \log E_2 / E_1$ 。例如，当 $E_2 = 100E_1$ 时，即得 $m_2 - m_1 = -5$ 。也就是说，亮度增大100倍，星等数就减小5。

在望远镜中看到的比6等更暗的星，依次为7等、8等……另一方面，比1等星更亮的，则为-1等、-2等……总之，每个星等的亮度都是次一等的 $\sqrt[2.5]{100} = 2.512$ 倍。太阳是-26.7等，整个夜空中的第一亮星天狼星是-1.4等，两者相差25.3个星等。由此易知，太阳要比天狼星亮 $(2.512)^{25.3} \approx 130$ 亿倍！

上面说的是“视亮度”。为了考察恒星真正的发光本领，必须将它们置于离我们同样远的某个标准距离上进行比较。在天文学中将这个距离取为10秒差距，即32.6光年，或约300万亿千米。一颗恒星移到这么远时的视星等，称为它的“绝对星等”。今天已经有不少办法可以测定天体的距离。例如，太阳离地球约1.5亿千米，而天狼星却远达8.6光年。若将太阳移到天狼星那么远，它的视亮度就会减弱到原先的三千亿分之一。由此可知，太阳的实际发光能力其实只是天狼星的1/25。太阳的绝对星等是+4.8等，天狼星则是+1.3等。

恒星每秒钟从其整个表面发出的总能量，叫做恒星的“光度”。绝对星等表征了恒星光度的大小。例如，参宿七（猎户座 β ）的绝对星等是-7.0，光度达太阳的52000倍；离太阳最近的恒星半人马座比邻星，绝对星等是+15.1，光度是太阳的1/13000。

光度大的恒星称为“巨星”，光度小的叫做“矮星”。太阳，是一颗不算太“矮”的“矮星”。

赫罗图问世

对大多数恒星而言，表面温度越高，其光度也越大，即绝对星等的数值越小；表面温度越低，光度就

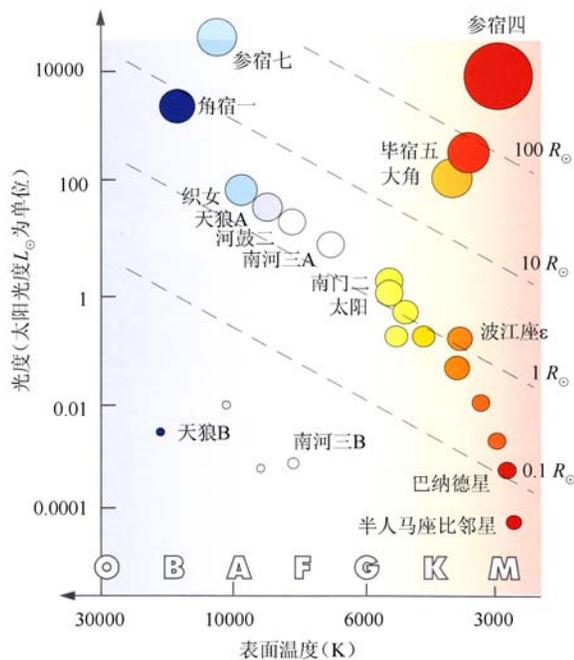


图4 一些著名恒星的光谱-光度图（赫罗图）

越小，即绝对星等的数值越大。

这一规律可以用恒星的“光谱-光度图”来表现。用横坐标代表恒星的光谱型，并标明与之相应的表面温度；纵坐标代表恒星的光度，用绝对星等（或阳光度 L_{\odot} 为单位）来表示。那么，根据一颗恒星的光谱型和它的绝对星等数值，即可确定它在图上应居什么位置。例如，太阳的绝对星等为+4.8，光谱型为G2，便落在图4中的“太阳”两字处。

20世纪初，丹麦天文学家埃纳尔·赫兹普隆（Ejnar Hertzsprung）和美国天文学家亨利·诺里斯·罗素（Henry Norris Russell）各自独立地作出了上述发现。赫兹普隆的研究结果以“恒星辐射”为题，于1905年和1907年发表在德国的《科学照相杂志》上。但这不是天文专业刊物，故未引起天文界的关注。

1913年6月，罗素在英国皇家天文学会非常简要地作了《巨星和矮星》的报告，首次展示一幅光谱-光



图5 丹麦天文学家赫兹普隆

度图。同年 12 月，他在美国科学促进会与美国天文学会联合召开的会议上宣读著名论文《恒星光谱型与其他特征之间的关系》，再次展示了他的光谱-光度图。1914 年，此文在《大众天文学》杂志上发表。其中首次正式公布的光谱-光度图，同时在英国著名的《自然》杂志上刊出。

在罗素的光谱-光度图中，大多数恒星都落在从左上到右下的一条对角线上。这条对角线称为“主星序”，简称“主序”。主序上的恒星称为“主序星”，它们的光度随着颜色变红而下降。太阳大致就位于主序的中部。另有一些恒星弥散地分布在图的上方，构成巨星支，它们的光度要比相同温度的主序星高得多。

在 20 世纪 30 年代以前，光谱-光度图通常被称为“罗素图”。1933 年，丹麦著名天文学家本格特·丹尼尔·斯特伦格伦（Bengt Daniel Strömberg）据实强调了赫兹普龙的贡献，并引入术语“赫兹普龙-罗素图”，这一称谓方始改变。后来，它又简称为“赫罗图”。

在赫罗图中，巨星的上方还有一些光度特大的星，称为“超巨星”。图的左下方有一些温度高颜色白、但光度却很小的恒星，称为“白矮星”。罗素第一幅光谱-光度图的左下角有一颗星——波江座 40B，乃是日后被确认的第一颗白矮星。

到达主序

前文已经提到，星际云碎块进入第 4 阶段，即坍缩成原恒星之后的进程，可用赫罗图上的“演化程”

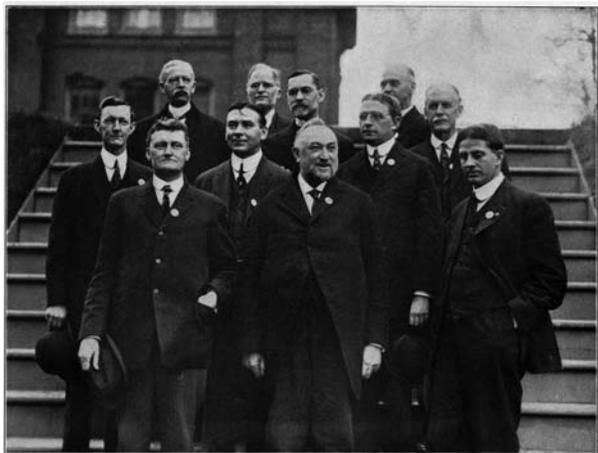


图 6 1913 年 12 月在美国天文学会会议期间罗素（右 4）与皮克林（前排左 2）等合影，会上罗素展示了他的光谱-光度图

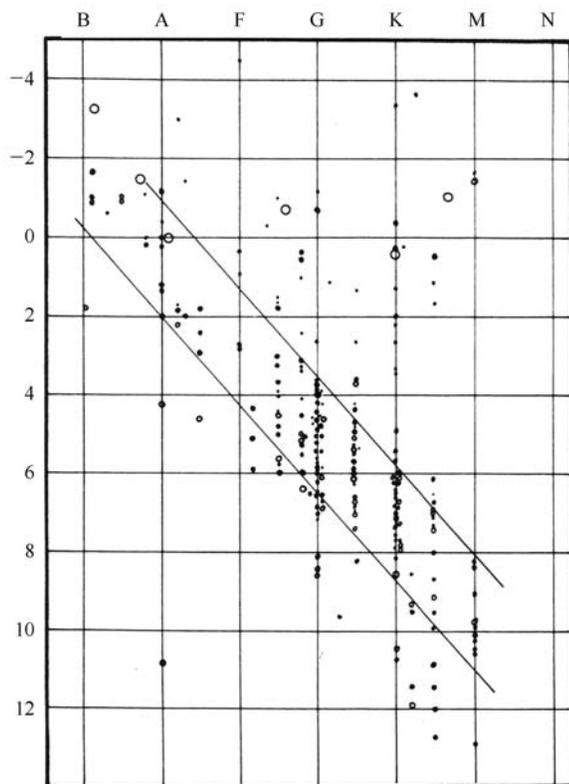


图 7 罗素于 1914 年正式发表的第一幅光谱-光度图，通常被视为现代赫罗图的原型

来阐释。“演化程”，就是随着恒星的不断演化，其对应点在赫罗图上纵横驰骋的轨迹。图 8 是 1 个太阳质量（记为 M_{\odot} ）的恒星从原恒星演变至主序星的演化程。图中的虚线称为等半径线，例如处于 $100R_{\odot}$ （ R_{\odot} 表示太阳半径）那条虚线上的恒星，半径均为太阳半径的 100 倍。

第 5 阶段——原恒星 相应于从图 8 中的标号 4 至标号 5，恒星的半径收缩到 $10R_{\odot}$ ，光度迅速下降，而表面温度有所上升。原恒星的中心温度达到约 500 万 K 时，内部的热能往外倾泻，致使星体的收缩不断减缓。

第 6 阶段——恒星诞生 在最初现身约 1000 万年之后，这颗原恒星收缩到半径约 100 万千米，中心温度上升至 1000 万 K，从而开启了每 4 个氢原子核合成 1 个氦原子核的热核聚变，由此产生的巨额能量，标志着一颗真正的恒星终于诞生！此时的演化程到达图 8 中的标号 6。

第 7 阶段——到达主序 第 6 阶段的恒星继续收缩，恒星的中心温度上升到 1500 万 K，表面温度约

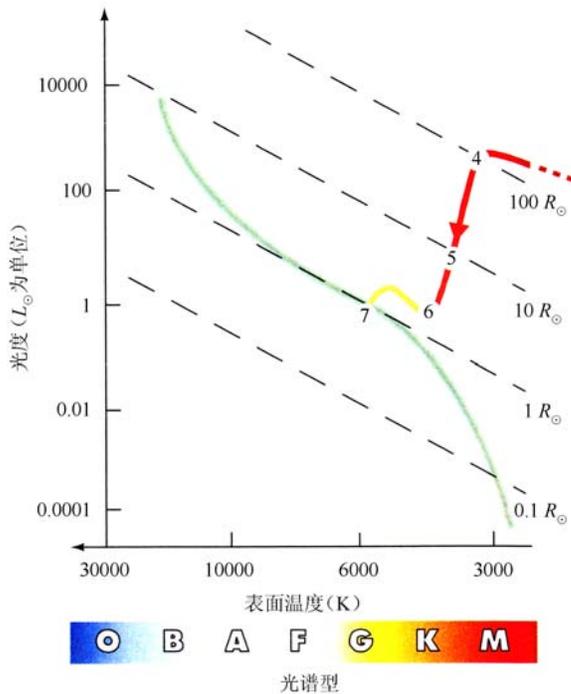


图8 $1 M_{\odot}$ 的恒星从原恒星（图中标号4，代表“第4阶段”，下依此类推）演化为主序星（标号7）的演化程

6000K。当恒星内部向外的辐射压力与向内的重力最终达到平衡时，它在赫罗图上就正好到达主序。形成一颗 $1 M_{\odot}$ 的恒星，全过程约需 5000 万年。形成质量更大的恒星，所经历的阶段与此相似，但进程要快得多。质量小于太阳的恒星，形成的过程则慢得多。质量大的恒星光度大、温度高，进驻到主序的上部；质量小的恒星光度小、温度低，进驻主序的下部；质量和太阳相近的恒星，光度和温度都适中，则占据主序的中部。

主序星阶段，是恒星的青年和壮年时代。这一阶段的恒星，内部进行着稳定的热核聚变，恒星的亮度基本保持不变。从外往里的引力和从内往外的辐射压

表2 $1 M_{\odot}$ 恒星之形成过程

| 阶段 | 到下一阶段的近似时间(年) | 中心温度(K) | 表面温度(K) | 中心密度(粒子数/m ³) | 直径(km) | 天体 |
|----|-----------------|----------|---------|---------------------------|-------------------|---------|
| 1 | 2×10^6 | 10 | 10 | 10^9 | 10^{14} | 星际云 |
| 2 | 3×10^4 | 100 | 10 | 10^{12} | 10^{12} | 星际云碎块 |
| 3 | 10^5 | 10000 | 100 | 10^{18} | 10^{10} | 云碎块/原恒星 |
| 4 | 10^6 | 1000000 | 3000 | 10^{24} | 10^8 | 原恒星 |
| 5 | 10^7 | 5000000 | 4000 | 10^{28} | 10^7 | 原恒星 |
| 6 | 3×10^7 | 10000000 | 4500 | 10^{31} | 2×10^6 | 恒星 |
| 7 | 10^{10} | 15000000 | 6000 | 10^{32} | 1.5×10^6 | 主序星 |

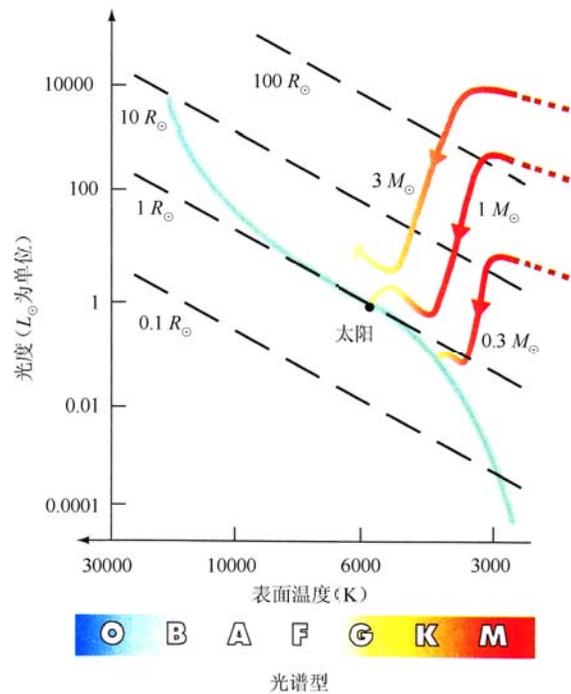


图9 几个不同质量的恒星到达主序之前的演化程

力势均力敌，所以恒星处于平衡状态，既不收缩也不膨胀。太阳已经在主序星阶段约 50 亿年，而且还将继续如此度过 50 亿年。也就是说，目前的太阳正当中年。表 2 概括了形成 $1 M_{\odot}$ 恒星的诸阶段的特征。

离开主序

第 8 阶段——亚巨星支 恒星核心的氢燃尽后，成为一堆“氢炉渣”。由于热核反应无以为继，恒星内核向外的压力便不足以抵御向内的重力，于是恒星内核开始紧缩。在内核的外围，是一个氢继续燃烧的薄壳层。随着氢核心的继续收缩，氢燃烧壳层的产能率在不断增长，这驱使恒星的外层膨胀，星体半径达约 $3 R_{\odot}$ ，因此恒星看起来更亮了！因为恒星表层的膨胀会导致表面温度下降，故相应的演化程是从图 10 上的标号 7 到标号 8，称为“亚巨星支”。

不同质量的恒星处于主序阶段的时间互不相同：质量特大的恒星宛如一只特大型的核燃烧炉，异常猛烈的热核聚变致使核燃料很快消耗殆尽，因此它们的青壮年时期很短暂，不久就进入了老年。相反，小质量恒星内部的热核聚变比较平缓，核燃料消耗得很慢，它们的青壮年时期就要长得更多。例如， $15 M_{\odot}$ 的恒星

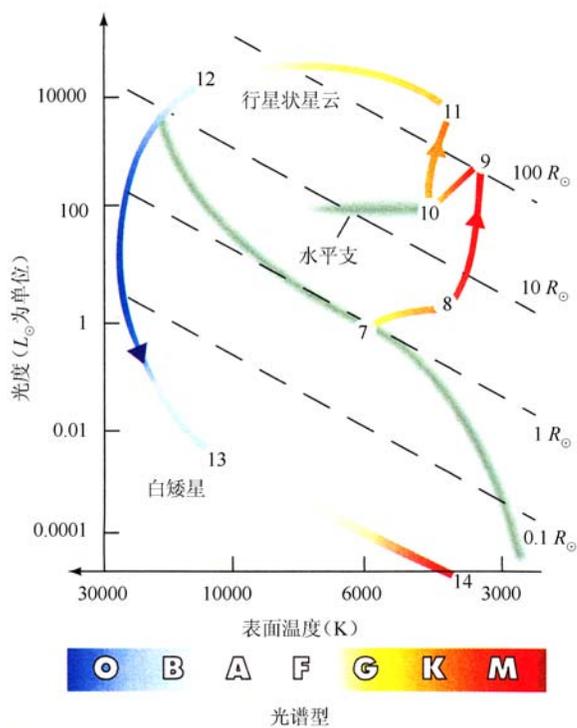


图 10 $1M_{\odot}$ 的恒星从主序星阶段往后的演化程

停留在主序阶段的时间只有 1000 万年， $0.2M_{\odot}$ 的恒星却可在主序阶段逗留数千亿年。

表 3 归纳了 $1M_{\odot}$ 的恒星从主序阶段往后的整个演变过程。

红巨星

天文学家曾以为，恒星是沿着赫罗图上的主序从 O 型演化为 B 型，再依次经历 A、F、G 型而最终成为 K 型和 M 型星的。后来查明，实际情况并非如此，但人们将光谱型 O、B 称为“早型”，将 K、M 称为“晚型”的习惯却一直保持至今。

第 9 阶段——红巨星支 恒星的氦核心继续收缩，氢燃烧壳层升温愈烈，星体外层迅速膨胀，半径几乎

达 $100R_{\odot}$ ，光度增大了数百倍！按常理，恒星表面积如此急速地变大，表面温度便应快速下降。但此时物质的对流将星体内部的巨额能量带到了表面，致使恒星的表面温度几乎保持不变。在图 10 中这一阶段的演化程是从标号 8 到标号 9，称为“红巨星支”。

红巨星氦核心的尺度仅约为整个星体尺度的千分之一，物质密度却高达 10^8 kg/m^3 。整个恒星有四分之一的质量就浓缩在这个仅比地球大几倍的范围内。

北天最亮的恒星大角星（牧夫座 α ），便是这种处于红巨星阶段的小质量恒星的典型实例，其质量约 $1.5M_{\odot}$ ，目前半径约为 $21R_{\odot}$ 。

第 10 阶段——氦聚变 $1M_{\odot}$ 的恒星离开主序后数亿年，星体的中心温度逐渐上升到 10^8 K 。这已经是氦原子核聚变为碳原子核所需的温度。于是，恒星的核心部分重新“点火”，原先的“氦炉渣”现在成了“氦燃料”，开启了 3 个氦原子核聚变成 1 个碳原子核的反应。由于氦原子核就是 α 粒子，故此反应常称为 3α 过程。反应很猛烈，其产能效率比氢的热核聚变更高。这一阶段，发生在恒星内部的具体物理过程相当复杂，相应的演化程在图 10 中表现为从标号 9 至标号 10，恒星到达水平支。

第 11 阶段——渐近巨星支 现在，恒星核心的氦燃尽，生成一个由“碳炉渣”构成的内核。恒星核心又因热核反应无以为继而再次收缩，同时外层再度膨胀，在图 10 中演化程表现为从标号 10 到标号 11，称为“渐近巨星支”。恒星的半径和光度超越了先前的任何阶段。

对于 $1M_{\odot}$ 的恒星，随着碳核心的不断收缩，其中

表 3 $1M_{\odot}$ 恒星后半生的各阶段

| 阶段 | 到下一阶段的近似时间 (年) | 中心温度 (K) | 表面温度 (K) | 中心密度 (kg/m^3) | 半径 (km) | R_{\odot} | 天体 |
|------|-----------------|----------|----------|--------------------------|-----------------|-------------|-------|
| 7 | 10^{10} | 1500 万 | 6000 | 10^5 | 7×10^5 | 1 | 主序星 |
| 8 | 10^8 | 5000 万 | 4000 | 10^7 | 2×10^6 | 3 | 亚巨星支 |
| 9 | 10^5 | 1.0 亿 | 4000 | 10^8 | 7×10^7 | 100 | 氦聚变开始 |
| 10 | 5×10^7 | 2.0 亿 | 5000 | 10^7 | 7×10^6 | 10 | 水平支 |
| 11 | 10^4 | 2.5 亿 | 4000 | 10^8 | 4×10^8 | 500 | 渐近巨星支 |
| 12 | 10^5 | 3.0 亿 | 100000 | 10^{10} | 10^4 | 0.01 | 碳核心 |
| (12) | - | - | 3000 | 10^{-17} | 7×10^8 | 1000 | 行星状星云 |
| 13 | - | 1.0 亿 | 50000 | 10^{10} | 10^4 | 0.01 | 白矮星 |
| 14 | - | 接近 0 | 接近 0 | 10^{10} | 10^4 | 0.01 | 黑矮星 |

心温度在继续升高，但是永远达不到将“碳炉渣”转变成“碳燃料”，启动新一轮的核聚变所需的温度——6 亿 K。这颗红巨星已经临近核燃烧的尽头。

寿终正寝

第 12 阶段——行星状星云 随着恒星核心燃料耗尽，星体因剧烈收缩而变热，在赫罗图上表现为向左移动。此时恒星开始变得不稳定，从内部倾泻出巨热，将外层物质猛推出去。被抛出的物质不断膨胀扩散，形成“行星状星云”。行星状星云的外观略呈圆形，有点像望远镜中所见的大行星视圆面，故名。在银河系中，目前已知的行星状星云超过 1500 个。

第 13 阶段——白矮星 在行星状星云的中央，原本在红巨星中隐蔽得很深的恒星核心，现在开始暴露出来，其质量与太阳相近，大小却仅与地球相仿。它初现之时具有白热的表面，但因发光面积太小而很暗弱。这种星就是白矮星，见表 3 和图 10 中之标号 13。有许多白矮星并不位于某个行星状星云的中央，是因为那个行星状星云已经膨胀太久，其物质扩散到太空中“烟消云散”了。

白矮星的物质密度极高，像火柴盒那么大小的一块白矮星物质差不多就相当于地球上的一卡车货物。密



图 11 位于天琴座中的环状星云约于 6000 年前形成，正以 20 ~ 30 km/s 的速度往外膨胀，目前的尺度约为 1 光年。它的中央有一颗白矮星

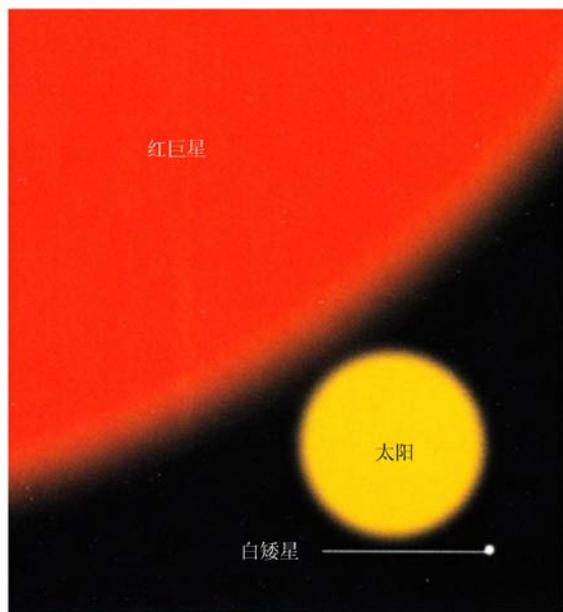


图 12 红巨星、太阳和白矮星的相对大小

度如此之高的缘由是，白矮星自身的强大引力把组成星体的原子都压碎了：电子被挤出原子，原子核和原子核彼此挤在一起，因此整个星体的体积大为缩小。处于这种状态下的“简并物质”，会产生一种特殊的“简并压力”。白矮星没有热核反应，仅靠散发余热而发光。正是由于电子的简并压力顶住了星体物质自身的引力，星体的收缩才停顿下来。

第 14 阶段——黑矮星 一颗孤立恒星成了白矮星，其演化就终结了。双星系统中的白矮星还可能有了新的活动，但与本文的中心议题已有所偏离。孤立的白矮星随着时间的推移而冷却变暗，其演化程沿着赫罗图的底部由白到黄再到红，在图 10 中的表现是从标号 13 至标号 14，最终成为一颗黑矮星。

白矮星在冷却过程中逐渐变暗，但是不再显著地收缩。重力不足以进一步压缩密度已经如此之大的星体。直到变成黑矮星，尽管温度几乎降到了绝对零度，它基本上仍然保持着地球般的大小。黑矮星是恒星燃尽后的又冷又密的余烬，堪称恒星坟场中的尸骸。表 3 末行列出了它那些不平凡的特征。

质量更大的恒星

质量是恒星最重要的一个物理量。恒星如何度过其一生，主要取决于它的质量。前文讲述了 $1M_{\odot}$ 的恒

星在赫罗图这张“棋盘”上如何纵横驰骋，质量更小的恒星也与此相仿，更引人入胜的“剧情”则属于大质量的恒星。

大质量恒星离开主序变成红巨星之后，在其内部将会渐次点燃更加复杂的核聚变，详情可参阅本期《现代物理知识》“化学元素的起源”一文。这些恒星到了垂暮之年将会猛烈爆发，抛出巨量外层物质，成为新星甚至超新星。剩下的核心部分，则依质量不同而有着不同的归宿。

一颗恒星质量越大，引力就越强，它爆发后剩下的物质也聚集得越紧密。如果恒星爆发后残留的物质不超过 $1.4M_{\odot}$ ，那么它最终将坍缩成一颗白矮星。

如果爆发后残留的物质超过 $1.4M_{\odot}$ ，而又小于 $3M_{\odot}$ 倍，那么它就可以一直坍缩到如此程度：本来在原子核外的电子被挤压到原子核里面，并和原子核内的质子结合成为中子。这时，整个星体几乎全由紧挤

在一起的大量中子组成，因此其物质密度比白矮星还要高很多。在中子星内部，中子的简并压力与星体自身的引力相抗衡，从而制止了进一步坍缩。一颗中子星的直径仅一二十千米，质量却达到太阳的二三倍，因此其密度竟高达每立方厘米上亿吨！

还有更令人吃惊的情况：坍缩恒星的质量更大时，其物质将会聚集得极其紧密，以至于任何力量



图 14 白矮星、中子星和恒星级黑洞的相对大小

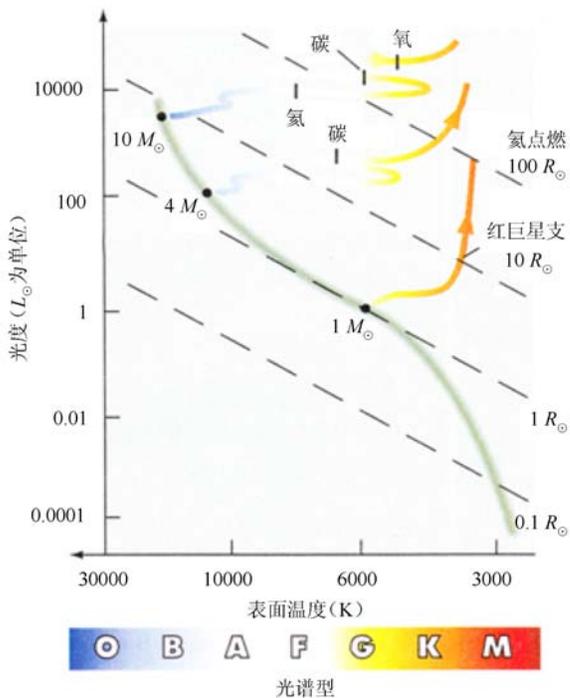


图 13 $4M_{\odot}$ 和 $10M_{\odot}$ 恒星的演化程。 $1M_{\odot}$ 恒星用作比较，仅图示到氦开始燃烧，它几乎沿红巨星支垂直地上升。质量较大的 $4M_{\odot}$ 恒星大致沿水平方向从主序进入红巨星区。质量最大的 $10M_{\odot}$ 恒星渐次进入一些新的燃烧阶段，图中用元素名称标明在恒星内核相应元素开始热核聚变的节点

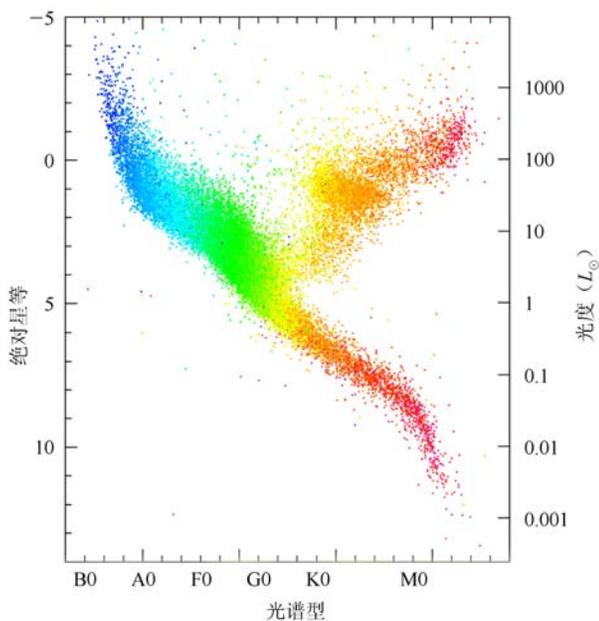


图 15 一幅今日的赫罗图，涉及的恒星数以万计。推算恒星光度所需的距离数据源自“依巴谷卫星”的观测结果

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜； 她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目，并于 2009 年增加了彩色中

心插页。

2014 年《现代物理知识》每期定价 9 元，全年 6 期 54 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007 ~ 2011 年单行本每期 8 元；合订本每本 50 元；2012 ~ 2014 年单行本每期 9 元，合订本每本 60 元。

都无法遏制坍缩的继续进行。星体变得越来越小，引力则变得越来越强，任何东西一旦陷入其中，就再也不能复出。它仿佛是一个深不可测的“无底洞”，就连光线都无法逃遁。于是，它就获得了一个独特的名称：“黑洞”。

尾声

超新星爆发抛出的物质，经过成百上千万年的膨胀，终于变得十分稀薄，与原先已经存在的星际尘埃——气体混为一体。这些被超新星爆发“污染”了的星际云，又会形成下一代新的恒星。

恒星的寿命有长有短，但它们的一生都是这样度过的。赫罗图中多数恒星分布在主序上，既说明多数恒星正处于青年和壮年时期，也说明青壮年时期占据了恒星一生的大部分时间。揭开恒星演化之谜，是 20 世纪天文学乃至整个自然科学中最伟大的成就之一。在此过程中，赫罗图功不可没。

关于赫罗图，还有许多重要内容，例如星团赫罗图、赫罗图上的不稳定带等，或可来日再叙。20 世纪天文学进展迅速，今日赫罗图较诸百年前亦已面目一新。赫兹普龙和罗素泉下有知，焉能不为后来人鼓舞欢欣？