
电子图书
信息技术的结晶
人类文明的载体
网络的基本资源

序　言

我写这本书的主要目的，在于以足够的深度对广泛的天体物理学课题向读者提供一般的介绍，从而使读者能对这门学科的全貌有一个定量的了解。本书概要地论述各种宇宙事件，但未加以详细的介绍，旨在提供一系列天体物理学的轮廓。鉴于天体物理学中的许多问题目前还不太明确，不少观点尚在不断变化之中，我认为采取这样一条途径是比较恰当的。

本书内容取自我在科内尔大学为物理学和天文学毕业班学生及初级研究生讲课的讲稿，这门教程决定了本书的写作深度。

为了方便那些精通物理学但对天文学名词却不熟悉的读者，书中添加了一个附录 A，它扼要地介绍了一些最基本的天文学概念。应该先阅读这个附录，然后再接触正文。

前面几章概括地叙述了现代天体物理学所涉及的范围，同时论述了有关天体的大小和质量的一些基本问题。然而读者马上就会发现，再深入下去需要有广泛的物理学基础。第四章至第七章就是以天文学所特有的现象为例，对有关这方面的知识由浅入深地作了介绍。第八章至第十章则对第一章中已初步提到过的那些内容作了进一步的阐述，指出我们怎样才能对有关恒星的结构和演化、宇宙气体动力学以及宇宙的大尺度特性等问题取得定量的深入的了解。最后一章讨论了宇宙中的生命。

通贯全书，我特别强调的是天体物理学的概念，这意味着象小行星、恒星、超新星或者类星体这样一些天体没有列出专门章节一一介绍，而是在讨论有关的物理原理时把它们穿插于全书之中。这样就突出了许多天文现象的共同特征，但也提供了某些特殊天体的部分资料。例如，第五章、第六章、第八章、附录 A 以及其他一些地方，就从各个不同的侧面对中子星和类星体进行了讨论。

我们所述及的仅仅是几个传统天文学课题的大致轮廓，比如辐射转移理论、恒星大气以及多层气体球等，这是因为完整的介绍必然要用到大量的纯粹的数学推导。尽管如此，这些课题的主要物理概念都已穿插在正文之中了；它们通常只是一些一般性的叙述，不再作专门的说明。另外，在适当的地方我还援引了对这些课题有更详细说明的其他一些资料来源。

参考书目是为那些愿意在某一个方面进行更深入研究的读者提供的。我仅仅举出了这样一些作者，他们对某一领域卓有贡献，因而他们的观点可以使读者对有关课题取得更深入的了解，尽管其中所引用的某些文章只是普及性的，然而文笔却相当严谨。

涉及到天体物理学主要内容的一部书，必然要以现有的许多优秀的专题论文和评述性文章作为前导。要恰当地感谢原作者和那些对我的写作观点有强烈影响的天体物理学家是不可能的。我同样要向科内尔大学的同事以及看过这本书（它从一系列非正式的教学讲稿演变而来）的几届学生表示感谢，他们为本书提供了许多改进的意见。最后，我还要对为本书提供了插图的 B．L．贝特彻表示谢意。

马丁·哈威特

第一章研究天体物理学的一条途径

从某种意义上说，我们每一个人都曾处于恒星之内；从某种意义上说，我们每一个人又都曾处于恒星际广袤的虚无空间之中；而且，如果宇宙确曾有开端的话，那么我们每一个人也都在那儿停留过。

我们体内的每一个分子所含的物质都曾一度经受过恒星中心巨大的温度和压力的剧烈作用，我们红血细胞中的铁就是在那儿起源的。我们所吸入的氧，人体组织中的碳和氮，以及骨胳中的钙，它们也是在恒星中心通过较小原子的聚变而形成的。

地球上的矿物中包含了铀、钚、铅以及许多别的重原子，它们必然是在一次超新星爆发中生成的，这种爆炸就是一颗恒星的自行毁灭，它把一个太阳那么大的质量以极其巨大的速度抛入宇宙空间之中。实际上，地球上以及人体内的大多数物质都必定经历过这样一种灾变式的事件。

我们发现元素锂、铍和硼在地球上的含量甚少，它们看来是通过星际空间的宇宙线轰击而生成的。在那个时代，我们今天所生活的地球曾经分布得极度稀薄，以致一克土壤所占有的体积就有我们整个行星那么大。

为了说明地球上所发现的重氢同位素——氘，我们也许不得不回溯到意味着整个宇宙诞生的那一次爆炸。孩子玩的气球内的氦，有一部分也就是在那个时候形成的。

所有这一切我们是怎么知道的呢？而对这种知识，我们又能相信到什么程度呢？

写这本书的目的就是要回答诸如此类的问题，并为作出天体物理学的判断提供一种方法。

我们现正开始在宇宙间作一次漫长而又有趣的旅行。许多东西要学习，许多东西要丢弃，又有许多东西要加以修正。我们有卓绝的理论，但理论只是掌握真理的向导，它们并不是真理本身。因此，我们就必须不断地对理论加以修正，才能保证引导我们在正确的方向上前进。

在通览本书的过程中，我们会发现要在实质和表象之间作出选择是十分困难的，就象去发明新理论时的情况一样。我们一定要明白，作出这种选择也许还为时过早，天体物理学中的真实性往往是短命的；而且一定要知道——虽然这是令人苦恼的，我们也许总有一天不得不正视现实，即我们的理论所认识的只不过是一些皮毛，而不是比较深入的真正有推动力的因素。

因此，我们可以恰到好处地避开天体物理“事实”所带来的某种先入之见。我们应该把目光放远一些，而且应该紧紧抓住可能对我们认识的未来演变起一定作用的那些物理概念。我们可以按下面的路子进行推理。

最近几十年来天体物理学的进展是带有革命性的。我们放弃了那些过去看来是十分可靠的理论，而代之以新的理论，而且常常发现甚至连替代的理论都难以找到。在这场革命中，唯一不变的就是许多天体物理学的概念。它们没有发生本质上的变化，而且一直在为我们演变中的理论不断地提供资料来源。

在这些概念中就有中子星，从提出到发现，其间经过了 35 年；还有黑洞，在提出这一概念后过了 30 年，天文学家们才开始着手寻找这类天体。因此，我们的精力最好放在对这些概念进行更深入的探究上。

在天体物理学中，我们常常会感到为难的是：我们应该围绕着个别的天体——行星、恒星、脉冲星和星系——来构思呢，还是应该根据不同的天体物理过程所共有的物理学原理来划分课题。

我们既然强调的是概念，那么取第二条途径就比较合适。但是这也会带来一些问题，有关各类天体的许多资料就会遍及全书，因而只能通过索引来加以收集，这就会导致叙述上的某种不平衡。

这种不平衡由于数学处理方式的不同而变得更为严重，因为任何天体物理图象，要是我们不能给它们的尺度以某种数值，那就是不完整的。所以，在本书中，我们的宗旨是要去取得不同现象各特征量的大致量级。在某些场合下，这样做不会带来任何数学上的困难。但在另一些问题上，我们则不得不先有一些相当复杂的数学预备知识，然后才能找到那甚至极为粗糙的答案。第十章中对宇宙曲率的估算，就是这种比较复杂的过程的一个例子。

说明了这些困难——看来它们部分是由现代天体物理学的性质所决定的——之后，让我们来研究一下使用本书的最有效的方法。

对于那些原来缺乏天文基础知识的人，附录 A 可以为之提供一个良好的起点。它扼要地描述了我们将要研究的天体，并介绍了天文学上所用的符号，这种符号法将在全书中予以应用，而其他章节中一般就不再给它下定义了。至于那些以前学习过天文学的人，他们就可以直接从本章开始，这一章所叙述的是目前天体物理学中正在热烈进行着的探索工作，也就是我们所要寻求答案的那些问题。第二、第三章表明，尽管宇宙的某些粗略尺度可以通过在概念上比较简单的那些方法来加以测定，然而，为了掌握宇宙的能源以及宇宙演化的性质，就需要对物理学有一个比较深入的了解。因此，在中间的第四章到第七章就叙述了我们所需要的物理学工具。接下来，我们就集中利用这些工具去努力论述本文开始时就提到过的化学元素合成理论、恒星的形成和演化、星际空间所发生的种种过程、宇宙的演化，以及生命起源的天体物理背景。

这是一个动人的、富有挑战性的大胆尝试；但是，我们还有很长的一段路要走。

让我们开始吧！

1.1 获得天文学信息的渠道

让我们设想有那么一颗行星，在它的上面居住着一批没有视觉的文明生物。某一天，有一位发明家发明了一种能够感受可见光的仪器，并且发现这种仪器的用途非常广泛，特别是对于天文学很有用处。

人类是能够看见光线的，因而我们同那些还正在寻找能探测可见辐射方法的任何文明生物相比，在天文学上就大为领先了一步。然后，我们再想象有一种比我们更为先进的文明生物，他们不仅有能力探测到可见光，而且可以探测到所有其他的电磁辐射；并且还拥有能感受宇宙线、中微子和引力波的望远镜和探测器。显然，这种文明生物的天文学知识可以远比我们所掌握的为多。

现在已经知道存在着四条完全互不相干的渠道，遥远宇宙中的信息就是通过这些渠道传到我们这儿来的。

(a)电磁辐射：γ射线、X射线、紫外线、可见光、红外线，以及射电波。

(b)宇宙线粒子：这包括了高能粒子、质子、较重的核以及（不稳定的）中子和介子。某些宇宙线粒子是由反物质构成的。

(c)中微子和反中微子：存在两种不同类型的中微子和反中微子；一种和电子有关，而另一种和μ介子有关。

(d)引力波。

我们中间大部分人对渠道(a)都是熟悉的，目前大量的天文资料就是通过这条渠道获得的。既然如此，我们就只对(b)，(c)，(d)三条渠道作一番简要介绍。

(b)渠道。宇宙线粒子和其他三种信息载体之间有以下本质上的差异：(i)宇宙线粒子以十分接近光速的速度运动，而别的载体则完全以光速运动；(ii)宇宙线粒子具有正的静质量；以及(iii)因为宇宙磁场可以使这些带电粒子发生偏折，所以到达地球上的宇宙线粒子的方向同粒子源实际方向之间通常并没有简单的关系。

宇宙线天文学远比中微子或引力波工作领先得多。在这方面已经有了探测器和探测器阵，然而技术上的困难还是很大的。尽管如此，我们仍然希望通过对宇宙线的研究能了解到许多大尺度宇宙化学方面的知识，并且希望能最后找到产生这些高能粒子的巨型宇宙加速器所在的天区（这是我们今天还不知道的）。我们还不知道宇宙线粒子是怎样获得又是在哪儿获得这样高的能量的；我们只能作些猜测，设想种种有关宇宙线起源的理论（Ro64a，Go69，Gu69）。

(c)渠道。中微子就象光子一样具有零静质量。这种粒子有一个很显著的优点，那就是能够穿透极厚的物质而不被吸收中微子天文学可以使我们直接观测到星体的内部，就象X射线可以用来检验金属部件内部的缺陷和诊断内科病人的肺部病灶一样。中微子还可以传递关于过去年代的宇宙的信息，因为除了宇宙膨胀所造成的系统性能量损失之外，中微子几乎可以原封不动地保存整整好几个依恩（aeon）①。必然有相当一部分宇宙史记载在我们周围的中微子流内，但是目前我们还不知道怎样取用这种信息（We62）。

人们已经对太阳中微子作了首次认真的探索，结果表明太阳所发射的中微子比预期的要少（Da68）。为此人们再一次对有关太阳内部所发生的核反应理论进行了研究，但是谜底仍然没有揭开。预期的中微子流超过了观测值！

(d)渠道。引力波一旦能可靠地探测到，就将为我们提供有关甚大质量天体的运动方面的信息。尽管已经作了种种努力，然而还不能完全断定今天是不是已确实探测到了引力波。但是，有关探测器所测得的讯号至今还无法用任何别的原因来加以解释，因而实际上可能就代表了引力波。所以，我们很可能处于重大发现的边缘，这类发现肯定会给天文学带来深远的影响（We70）。

显然，如果技术还没有发展到能探测出为我们传递信息的全部这四种主要媒介，天文学就不能算是圆满无缺的。在这一天到来之前，天体

需要全本请访问 www.ertongbook.com

物理学的理论就仍然只能是临时性的。

我们不仅一定要能够探测出这些信息载体，而且还必须研制出能覆盖各类载体全部频谱范围的各种探测器。射电天文学所作出的巨大贡献证明了这一问题的重要性。二、三十年之前，我们所有的天文资料还都是在可见光、近红外和近紫外区取得的；在那个时候任何人都没有认识到可以在射电频谱获得大量的信息。可是，今天我们所具有的唯一的一幅银河系图却是表示了远处旋臂中星际气体分布情况的射电天文图。所有这一切用可见光是看不到的，因为大量的尘埃云挡住了我们的视线。还有，最近在射电频谱发现了各种各样的新天体，其中许多是强有力的射电源，但是它们在波谱的可见部分却并不显得突出。

毫无疑问，为了促进宇宙线、中微子和引力波天文学的发展，人们将要付出巨大的努力。在发展的过程中可能会遇到大量技术上的困难，但是不做到这一点的话天体物理学知识看来是不可能臻于完善的。

正当我们开始致力于宇宙中微子和引力波的探测时，人们又提出了传递信息的第五种渠道的可能性。这条渠道的载体是超光速粒子：至今这还是一种假想的粒子，它们的运动速度要超过光速。关于这种粒子是否存在和是否能探测到的问题还没有弄清楚，然而清楚的是如果它们存在而且能够测量其数量的话，那将会使天体物理学发生一场革命。届时，我们就能够获得关于宇宙遥远区域内的、近乎今天的图象，而其他载体只能为之提供几十亿年前的信息。这样，我们对宇宙演化的了解就会大大地提高一步。还有，要是在银河系内或宇宙中的其他地方存在有智慧生命的话，那他们肯定会用超光速粒子来实现更快速的通讯。因此，目前有关超光速粒子的理论探讨和实验室内的实验可能对天体物理学具有更为重大的意义。

1.2 X 射线天文学：一门新兴学科的发展概况

天文学上一门新分支学科的发展常常遵循某种普遍的规律：笼统的理论性思考一点也不能使我们预料到任何新的进展。因此，只是当某种偶然性的观测结果把人们的注意力引到某个新的领域之时，才会认真地进行一些初步的测量。后来，随着技术上的改进，这些初始发现中的好多东西又不得不予以抛弃。

这种曲折的发展过程始终是引人入胜的；作为一个例子，我们来介绍一下 X 射线天文学的演变梗概，借以说明今后一些年内天文学和天体物理学上应有的发展方向。

1962 年以前，唯一观测到的就是太阳的 X 射线发射。这种射线的流量是如此的微弱，以致任何人都没有想到太阳系以外的能源会发出强 X 射线流。后来，在 1962 年 6 月，美国科学工程协会（ASE）的贾科尼（Giacconi）、格斯基（Gursky）和保利尼（Paolini）以及麻省理工学院的罗西（Rossi）（Gi62），在空中蜜蜂号火箭上安放了一组大面积盖革计数器。这些计数器的面积是特意加大的，目的是要能探测到由月球散射的，但仍然起源于太阳的 X 射线。计数器的灵敏波长范围是 2～8 埃。

这次观测的结果虽然没有能探测到月球的任何 X 射线流，但是却在离银河中心不远的某个天区内发现了一个 X 射线源，其 X 射线计数所得的弥漫背景流相对天空的其他部分是很显著的。各方面的证据表明，这

些能流可能不是从地球外层大气发出的，因而应该起源于宇宙空间。同一小组后来所进行的几次飞行证实了他们的首批结果。

美国海军研究实验室的一个研究小组对这一发现产生了兴趣。他们对太阳的 X 射线观测颇有经验，因而能够制造出一台灵敏度比贾科尼小组所用的高十倍左右的 X 射线计数器。海军实验室小组把仪器的视场限制为 10°，没有采用贾科尼小组的大视场方式，所以他们得到的天空图可以反映出较为精细的结构情况（Bo64a）。

结果，在天蝎座内探测到一个极强的 X 射线源，距银心约为 20°。最初，该源一直没有得到证认，照片表明那一部分天区内没有任何异常天体。海军实验室小组还发现了第二个源，强度是天蝎座源的八分之一。这一个源经证认就是蟹状星云，它是中国天文学家在公元 1054 年所观测到的一次超新星爆发的遗迹。海军实验室小组的成员有鲍耶（Bowyer）、拜拉姆（Byram）、查布（Chubb）和弗里德曼（Friedman），他们相信这两个源就是造成贾科尼小组所观测到的 X 射线发射的主要原因。

人们对这些源可能有的性质提出了许多种解释。有一些理论主张发射来自一种新的、高度致密的恒星，它们的核由中子组成。另一些则认为这种发射可能由极其炽热的星际气体云所造成。当时，由于所有的空间仪器都还没有足够高的角分辨率，因而根据观测资料不可能作出任何的判断。海军实验室小组并没有料到在后来的一些年内会取得这样的仪器分辨率。

接着，在 1964 年初，海军实验室的赫伯特·弗里德曼（Herbert Friedman）得悉大约在七个星期之后月球将遮掩蟹状星云，对于从最低限度上检验一个宇宙 X 射线源是延伸源还是恒星源来说，这是一次极好的机会。因为，当月球边缘通过一个轮廓分明的点源时，全部辐射便一下子截止。反之，一个弥漫源则是随着月球在天球上的运动慢慢地被掩去；这时，辐射应该渐渐地截止。

无论是天蝎座源还是蟹状星云，它们的月掩现象在许多年内就只有这么一次了；所以海军实验室小组进行了紧张的准备工作，七星期之后一台设备便告成功。对飞行时间的控制必须准确到秒级，因为所用的空中蜜蜂号火箭在高空的有用观测时间只有五分钟。可取的飞行时间有两次：一次在食始，一次在食终。鉴于飞行时间有限，不可能对掩始和终切都进行观测。

首次飞行时间确定为 1964 年 7 月 7 日世界时 22 时 42 分 30 秒，这个时间可以使该小组观测蟹状星云中心 2′范围内的掩始情况。火箭于规定时间前后半秒内发射，在高空中姿态控制系统对盖革计数器进行定向。发射后 160 秒控制系统开始对蟹状星云作自动跟踪，到 200 秒时已可观测到流量密度有显著的下降，而到 330 秒时 X 射线计数已降低到一般背景电平。这一缓慢的掩食过程说明蟹状星云是一个延伸源，于是可以明确地说，至少有一个宇宙 X 射线源是弥漫状的。别的源可能起源于恒星，但这一个肯定不是（Bo64b）。

大约在海军实验室这次飞行之后七个星期，科学工程协会? 麻省理工学院小组也准备检测 X 射线源的角大小。他们的实验较为通用，任何源都可加以观察，它基本上就是使用日本物理学家小田稔（Oda）（Od65）所设计的一台准直仪。这台装置由两片相隔距离为 D 的金属丝栅组成，D

要比丝间空隙大，而丝间空隙则比丝的直径 d 略为小些。

图 1.1 说明了这台准直仪的工作原理。如果源的角直径比 d/D 小，那么当准直仪窗口扫过该源时所探测到的讯号就会发生强弱交替的变化。要是 θ >>d/D，则探测到的讯号强度实际上将不随定向的改变而改变。

麻省理工学院? 科学工程协会小组在他们的首次飞行中发现，天蝎座源的角直径小于 0.5°。两个月以后的第二次飞行证实了该源的直径很小，实际上不到 1/8°。一年半以后该

图 1.1 (a)平行光线入射时，前丝栅在后丝栅上投出清晰的阴影。随着准直仪的旋转，影阴时而投在后丝栅的金属丝上，时而从丝间空隙中穿过，于是光线就交替地射出和遮去。(b)对于来自角直径 θ >>d/D 的光源所发出的光线，前丝栅投出的影阴是模糊的。这时，准直仪的旋转不会使出射 X 射线流量发生显著的变化

小组发现这个源一定还要小得多，直径不到 20″。在这次飞行中采用了丝栅间距不同的两台准直仪，这意味着两台准直仪的透射峰值仅在射线垂直入射时才彼此一致，并用这一方法测得了天蝎座源的精确位置（Gu66）。接着，东京天文台取得了一次光学证认，随后又在帕珞玛山得以证实（Sa66a）。原来这是一个闪烁着的强紫外天体，闪烁的时间间隔不到一分钟。这些正是接近极小光度阶段的老的新星所具有的特征。

天蝎 XR? 1 附近的恒星的亮度和颜色表明，这些恒星距离太阳为几百光年，从而使我们能够第一次对该 X 射线源的总的能量输出作出精确的估计。对于早期底片的研究发现，这个天体的平均照相亮度自 1896 年以来并没有太大的变化。

本书编写之时这些早期的观测结果大部分已经得到证实。然而，有趣的是发现蟹状星云中包含了一颗脉冲星，这使 X 射线天文学家们追溯以往所收集到的观测资料。其中某些记录表明了具有特征性的 33 毫秒脉动，还表明有相当一部分流量（10～15%）来自一个点源——现已相信这是在超新星爆发中形成的一颗中子星（Fr69）。我们认为蟹状星云基本上是一个弥漫状 X 射线源的观点就不得不加以修正了。

今天，对于许多别的银河 X 射线源已经确定了它们的位置并作了证认；它们常常具有类似天蝎 XR? 1 的紫色恒星状（点状）外形。有时这类天体的亮度会在数小时内突然增强好几个星等，另一些作规则的脉动，有点象蟹状星云脉冲星。迄今观测所及的 X 射线能量范围也相当宽，对于许多源来说，既可以获得它们的可见光谱，同时又可以得到它们的 X 射线谱。

人们还观测到了几个河外 X 射线源，其中第一个就是 M87，这是一个星系，并且知道它是一个强射电源（By67）。M87 是一个具有球状恒星分布的特殊星系，从该星系好象还抛出了一个气体喷流。喷流在可见光区呈浅蓝色，而且可能还发出由高度相对论性电子所造成的光辐射，这种电子绕着磁力线盘旋并且通过同步加速机制产生辐射（见第六章）——同步加速器中高度加速了的高能粒子就是通过这种机制释出能量的。

目前，理论家们对 X 射线源以及连续 X 射线背景辐射提出了各种各样的解释，后者看来遍布宇宙各处。人们正在制订许多实验计划以检验

这些理论。X 射线、可见光、红外以及射电天文学家们把他们的结果进行比较，以期能否找到一种共同的解释。进展是相当迅速的，也许在几年之内这一领域就不再会那么十分吸引人的了。但是到了那个时候，天文学家又将开拓出新的分支，并再次会激起人们的兴趣。

天体物理学上的种种发现，无论是已经作出的，或是将会作出的，它们的基本性质无疑会使大部分现有的理论将在今后几十年内作出引人注目的修改。今天所知道的许多知识只能看作是暂时性的，因而对这一领域内的各个方面都必须以一种正常的怀疑态度来加以剖析。

我们可以预料，许多知识仍然要利用过去年代那种内行之有效的方法来加以掌握。但是，在天体物理学的一些方面，特别是在宇宙学中，我们的思考方法本身以及解决问题的整个思路也许就是一种障碍。因此，对我们历来工作的起点作一番介绍是会有好处的。

1.3 物理学定律的合理建立

今天，天体物理学和天文学的含义已经变得差不多一样了。在早些日子里，人们根本不知道恒星的研究会和物理学有任何共同之点。然而不仅对恒星，而且对星际物质以及星系尺度上所发生的过程来说，用物理学解释它们的观测结果竟是如此的成功，以至我们敢于大胆地认为，所有一切天文过程都应该受物理学理论的支配。

但是，有几点是必须记着的。首先，我们用于天体物理过程的物理学定律，大部分以我们所能进行的实验为基础，而这些实验装备的规模是十分有限的。例如，我们测量光速的区域的最大尺度也只有 10^{14} 厘米左右，也就是太阳系内部的范围。我们对大尺度动力学的认识也是以对太阳系的详细研究为基础，然后再把在这样一个小范围上所获得的动力学定律外推到约 10^{18}～10^{28} 厘米宇宙尺度上所发生的过程，但是我们无法保证这种外推确有根据。

也许，这些局部定律实际上在宇宙质量和宇宙距离尺度的整个范围内确实是成立的；但是有一点我们必然记得：适用于 10^{-8} 厘米尺度的量子力学定律和我们根据厘米级物体做的经典测量所预期的定律相比，两者完全不同。

第二点是“自然界常数”的不变性问题，这与第一点在性质上是相类似的。在观测一个光线已传播了好几个依恩的遥远星系时，我们不知道电子和原子核过去所携带的电荷是否和今天的一样。如果电荷是不一样的话，那么所发出的光线的能量恐怕也会不一样，因而我们对所观测到的光谱的解释就必须加以改变。

第三点和宇宙的唯一性有关。

普通的物理学问题是通过实验来寻求解答的，我们改变所用仪器的一个特性，而同时注意对另外一个特性的影响。但是，宇宙问题却不允许这种手段。宇宙是唯一的，我们不能改变甚大尺度上的现象，至少在我们现有技术发展水平上不可能做到这一点；而且即使我们做到了也不一定会识别出真正的变化，简直找不到一样仪器它本身不会受实验的影响——能探测出这种变化的参考系是不存在的。简而言之，我们也许不是在问那些用物理学术语所能回答得了的问题。因为物理学方法取决于我们进行实验的能力，而且更一般地说来任何科学的方法也是如此；这

条途径对真正的宇宙问题也许是行不通的。

因此，目前的情况就是这样：关于某些至今看来彼此互不相关的天文事件我们知道得很多，我们觉得它们之间一定存在某种关系，但是却没有把握。正是因为不知道，就把我们的知识分成了若干个不同的“领域”：宇宙学、星系结构、恒星演化、宇宙线等等。我们是带着试试看的心理这样做的，但是所用的策略是通过解决各个小问题来寻求某种联系。我们总是期望把所掌握了的各个领域加以扩大，直至有一天在它们之间发生接触，从而在原先分离的各个领地之间建立起一座坚实的知识之桥。

对我们说来这条途径将使用多久？与宇宙唯一性有关的哲学上的困难在什么时候就会出现呢？对此我们现在还不知道；但是，当到达那一步时，我们预料会面临这个问题。

同时我们可以给自己提出若干个具体问题，尽管这些问题尚未解决，然而预期可以用我们现在所掌握的物理学定律来求得他们的答案。这类问题中有恒星、星系以及行星系统的起源和演化，还有关于各种化学元素的起源问题；而且也许随着我们对天体物理过程取得更深入的了解，生命本身的起源问题也将会弄得一清二楚。

下面几节将对这些问题中几个比较重要的特征给以简要的介绍。

1.4 恒星的形成

我们相信，我们所观测到的每一颗恒星都不会永远存在下去——因为它们的能源迟早总要消耗殆尽，所以我们必须对恒星的诞生作出解释。由于我们所认为是年轻的那些恒星总是与星际尘埃气体云相处在一起，因此我们断认，这种宇宙物质云必然在慢慢地收缩，形成越来越致密的凝聚体，其中有一些最终就坍缩到恒星那样的大小。

这一图象所包含的意义十分丰富。星际空间的尘埃微粒对辐射热量是十分有效的，一旦有一个氢原子与一颗尘埃微粒发生碰撞，微粒就略为得到加热，而这份能量便在电磁波谱的红外部分辐射出去。这种情况我们称为热辐射。

微粒辐射掉的能量使气体的动能减少，因为原子在和尘埃碰撞过程中所转移给微粒的就是这部分能量。气体在损失了动能之后，由于引力的作用就朝云的中央落去，在下落的过程中获得了某些动能，并再把其中一部分转移给尘埃微粒：冷却循环就这样重复地进行。原子还把它一部分朝向云中心方向的动量传递给微粒，这也引起微粒朝收缩着的云的中心移动。由于许多这类相互作用的结果，云就发生整体收缩。

微粒辐射并不是使原恒星放出能量的唯一辐射过程。原恒星云在坍缩过程中变得越来越热，各种分子和原子的能态都可以通过碰撞而得到激发。受激粒子便能发出辐射，然后又回复到基态。这种辐射有可能从原恒星云逸散到外部空间中去，而能量的这种净损失也会引起云的冷却（图 1.2）。

尽管这种图象看起来很有吸引力，但也存在着一些困难。首先，在形成一颗恒星的过程中原恒星不可能单单损失能量，它还必定会损失角动量。这是因为恒星的形成要求初始范围很广而又极其稀薄的气体云发生凝聚。但是观测表明，银河中心附近物质的轨道速度 w 比离银心较远

处物质的速度 w '来得大 ;因此,收缩中的云应该具有很大的初始角动量。我们可以设想物质的平均轨道速度约为（w+w '）/2，于是可以

图 1.2　原恒星云中的冷却过程(a)一个速度为 v 的原子轰击一颗微粒，它的动能是 $v^2/2$ 乘以原子的质量 m ;(b)微粒吸收能量并发出辐射，而原子则以较低的速度 v ' 离开，动能也就减少到 $mv'^2/2$;(c)，(d)，(e)中，一个原子和另一个原子或分子相碰。这第二个粒子先是达到某个激发（高）能态，图中以星号（*）表示之，然后发出辐射并回复到初态。在这个过程中第一个原子损失了动能，而如果所发出的辐射从云中逸出，那就表示整个云发生了能量损失。原恒星物质就是通过这种方式慢慢地收缩而形成一颗恒星

认为云边缘的物质以速度（w? w '）/2 绕着云中心旋转（图 1.3）。

一般说来，由密度为每立方厘米 1 个原子的星际云形成一颗恒星，所需要的物质要求坍缩气团的初始半径约为 10^{19} 厘米。就银河系内我们所处的部位来说,这么一段距离上所观测到的 w? w '约为 3×10^3 厘米·秒$^{-1}$，所以，每单位质量的角动量是 r（w? w '）／2～10^{22} 厘米^2·秒$^{-1}$。另一方面，从我们所观测到的典型恒星的表面速度所算得的单位质量角动量要比这个数字小好几个数量级，为 10^{16}～2×10^{18} 厘米·秒$^{-1}$！以太阳为例，实际上只有～10^{15} 厘米^2·秒$^{-1}$；但是太阳系总角动

图 1.3　靠近银心的物质的轨道速度比外圈的速度来得大，w＞w '，这一现象称为较差自转

量相当于 10^{17} 厘米^2·秒$^{-1}$。太阳系中行星绕太阳的运动占了太阳系角动量中的绝大部分，其中特别是木星的运动最为突出（另见图 1.9 和 1.7 节）。

所以很清楚，在一个恒星或一个行星系统的生成过程中，处于收缩中的原始星际物质云必然通过某种机制失去了它的几乎全部的角动量，得以保存下来的仅有几千分之一而已。

类似的一个问题和星际介质中初始存在的磁场有关。如果这个磁场主要是沿着某一个给定的方向，那么云收缩成恒星后最终的磁场也应具有这一方向；而且这个最初十分微弱而又有确定方向的磁场在原恒星物质的收缩过程中会高度地集中起来。一个初始强度为 10^{-7} 高斯的弱磁场 B——这已经比观测到的数值来得小（Ma72）——随着原恒星半径从 10^{19} 厘米减小到 10^{11} 厘米，其强度将会增大 10^{16} 倍。在这种收缩过程中 B 与 r^{-2} 成正比。这是因为，磁力线就好象与气体物质冻结在一起似的（6.2 节），云在收缩，通过云横截面的这种磁力线数目却保持不变。恒星表面所具有的实际磁场通常只有 1 个高斯左右，尽管某些特殊恒星的磁场可达几万高斯，但如果收缩过程中穿过星际物质的磁力线既没有破坏也没有损失，那么收缩后形成的恒星的磁场强度应为 10^9 高斯；两者相差仍然极为悬殊①。造成这种磁场损失的原因，乃是有关恒星形成问题中的一个重要的、尚未解决的部分。

让我们暂且把上面的观点放在一边，试以一种不同方式来观察恒星形成的问题。我们在推理之初曾经作了一个未必一定正确的假设：尘埃云和刚形成的恒星成协这并不一定说明恒星就是从这种尘埃云所形成

需要全本请访问 www.ertongbook.com

的。也许这里是存在某种因果关系，但是恒星是从虚无中形成，并且在这一过程中生成大量的尘埃云，这难道是不可能的吗？这样一种图象尽管因为它假定了一种显然是非物理的起源而显得缺乏说服力，但是毕竟至少是避免了角动量和磁场这两个困难。

我们应该牢记这一重要观点：也许恒星正是从“虚无”中产生出来的！但是，暂时说来，只要可能，我们还是宁肯在普通的物理学框架内进行工作。

既然决定这样去做，那么下面的两项工作将会带来丰硕的成果：即不仅研究恒星在目前是否正在从尘埃云中生成，而且研究它们在银河系历史的早期有没有可能从一种简单的、无尘埃的氦？氢混合体中生成。这样一条总的途径最终有可能导致对星系的形成及与之有关的宇宙学问题取得更深刻的了解。因为，正如我们将要看到的那样，星系中物质的化学组成看来在很大程度上要受到氢向氦的转变以及氦向较重元素转变的影响。某些较重元素最终要从恒星中抛出去而成为星际介质的组成部分。如果恒星不断地从星际介质中形成，那么今天刚形成的恒星同很久很久以前、星系尚很年轻时所形成的恒星相比，两者的化学组成可能会有明显的差异。化学组成上的这种差异实际上已经在一些极老的恒星光谱中观测到了，尽管有些令人惊讶的是，目前所形成的恒星的化学组成好象都同太阳差不多，而太阳的年龄是 5×10^9 年。

最最年老的恒星在表面成分上的这种差异确实表明它们是从化学成份不同的介质中形成的。而且，如果我们关于恒星演化的理论（下面的 1.5 节）是正确的话，那么在恒星内部所应该发生的基本物理过程就会与下述观测事实很好地取得一致：今天正在形成着的恒星同星系演化最初阶段所生成的恒星相比，前者的较重化学元素含量比较多。因此，我们是通过对恒星自生成以来演化情况的研究，来收集有关恒星从星际介质中形成的证据，同时对星系的生命循环作一番深入的了解。仅仅当这种观点所引出的结果与观测相矛盾时，我们才会转向某种要求恒星从虚无之中自然形成的理论。但是，即便如此，我们还是没有什么可回旋的余地。我们仍然必须解释为什么大约一百亿年前从“虚无”中形成的恒星具有较低的金属丰富度，而以同样方式在过去几百万年内形成的恒星会有较高的金属丰富度。这时我们不得不面临着一种令人有点感到别扭的结论——“虚无”居然发生了变化！

本节强调了在认识恒星形成的过程中所面临的困难，但是，通过过去二十年的研究，对于那些能够产生星际云的收缩、造成角动量损耗并引起磁场强度损失的物理过程已经有了许多新的见解。这类理论的出现意味着在彻底了解恒星形成这一基本问题的过程中取得了相当大的进步。但是，我们仍然需要大量的更为详细的观测资料，以便证明要未这类模型中确实有一些是说明了恒星的诞生问题，要未是恒星形成取决于我们迄今尚未考虑到的、完全不同的一系列物理过程。

1.5　恒星的演化

就算我们对恒星怎样诞生的问题没有太多的了解，那么关于它们在诞生之后如何演化的问题我们能说些什么吗？对此，我们可以很有把握地回答：“是的”。下面，我们将会看到这一点。

从恒星的颜色，或者分析它们的光谱，可以测得恒星的表面温度；要是把一组恒星的绝对亮度和对应的表面温度之间的关系用一张图来表示，那么我们就会发现，在这么一张所谓赫罗图或者说是颜色？星等图上，只有在某些确定的区域中恒星的分布才特别密集。恒星在这类图的不同部位上的集聚情况为我们研究恒星演化的途径提供了一条主要的线索。不同星群的颜色？星等图是有所差异的。用太阳附近的星群所画出来的是一个样子，用银道面上松散的银河星团中恒星所画出来的是另一种样子（图 1.4）——这种星团一定非常年轻，因为它们的成员星非常亮，考虑到这些恒星有限的核能储备，它们存在的时间是不长的。银河系内某些最老的星群所画出来的又是一种样子（仍见图 1.4），这是一些很暗的恒星，在大约一百亿年内慢慢地耗尽了它们的核燃料，球状星团的成员便是这类恒星的典型代表。所谓球状星团是一种由几十万颗恒星所组成的、球对称的恒星集团，我们发现这种星团主要分布在银晕内，很少出现在银道面附近。

这些赫罗图尽管在细节上有所不同，但仍存在有一些共同的特征，图 1.5 概略地说明了这一点。虽然图 1.5 所表示的实际上并不是任何一个真正的恒星群，但它给出了位于赫罗图上不同部位的恒星的名称。

在纵坐标上我们标的是恒星光度的对数，以太阳光度（每

图 1.4　球状星团 M3 及银河系内若干银河星团的颜色？星等图。这些星团表现出对主星序有不同的转折点。根据核演化理论我们可以确定不同转折点处恒星的年龄，图的右边标出了它们的年龄（Sa57）

秒钟太阳发出的总辐射量）作为常用单位。横坐标给出恒星辐射表面有效温度的对数（4.13）。图上左边的恒星温度比较高，最高表面温度差不多等于 10^5K；右边的恒星温度比较低。亮星在图的顶部，暗星则在底部。从顶部左方朝底部右方沿对角线走向的是主星序，差不多有 90%的恒星都落在这条主星序上；除此以外其他地方的恒星则相当稀少。亚巨星和红巨星分支上的恒星属于一个星族，它们位于一个晕内，对银河中心多少有点呈球状分布。这些恒星有时称为星族 II 恒星，它们与星族 I 恒星不同，后者位于银道面上，使得银河系的这一部分特别明亮。O 型星和 B 型星是最蓝、最亮的主序星，它

图 1.5　示意性的赫罗图。图中斜率相同的那些斜线代表了具有同样半径的恒星（见 4.13 节）

们是星族 I 天体。我们知道这些恒星必然是在最近才形成的，仅仅根据光度就可以断定这一点。因为，现有的恒星演化理论很具体地说明了由氢向氦的转变是主序星能量的主要来源；而这些恒星的光度很大，因而它们必然在一个很短的时间内就完成了大部分这种转变过程。在这个过程中每克氢可利用的能量是已知的，于是我们可以算出 O，B 型星一定是在几百万年时间内把它们可予利用的氢转变成了氦。既然如此，我们相信这些恒星的年龄不会超过几百万年。相反，由于星族 II 天体中较明亮的成员正在向红巨星转变，而红巨星则是在中央核内的氢已全部耗尽了的恒星；根据这个事实，并考虑到这类恒星的氢燃烧率，我们就可以判断出星族 II 天体的年龄可能在 10^{10} 年左右。

恒星演化理论就是要解释赫罗图内恒星的分布情况：不但要说明为什么图中某些区域有恒星，另一些地方则没有；而且要说明为什么有些区域——特别是主星序——内恒星高度集中。而另一些地方却分布得相当稀少。

计算工作以恒星一生中不同阶段具体的核反应速率为基础，下面就是由这些计算所得到的恒星演化史。

随着一颗恒星从原始尘埃云开始收缩，它便变得十分明亮，但辐射温度很低，以至超出了我们图的范围，落在赫罗图的右边缘之外。恒星在这一阶段只有红外辐射，不过处于这种状态的恒星其寿命极为短促，以至这类天体迄今一直没有得到证认。我们只是从理论上相信这一阶段是存在；然而红外天文学今天的目的之一就是要从实际上去发现并研究这类恒星。在这一阶段内，收缩使引力势能转变为动能，再转变为辐射，然后便散失在宇宙空间之中。原恒星的表面温度在这一阶段中几乎保持不变，但随着收缩过程中表面积的缩小，原恒星就变得越来越暗。它遵循的是在赫罗图的最右边一条几乎垂直向下的路线，称为林忠四朗（Hayashi）轨迹。

最后，恒星的收缩终于慢了下来，恒星不再以很高的速率失去它的引力势能；但是，温度在增加，而恒星就从右边缘穿越赫罗图，差不多沿着一条水平线朝主星序运动。当它到达主星序时收缩便告停止。在这一阶段恒星达到了这样一种致密结构；其中心温度已高到足以进行由氢向氦的转变。在这一转变过程中可以有 0.7%的初始质量转变为能量并辐射出去，每一克氢可以有 $0.007c^2=6\times10^{18}$ 尔格的能量离开恒星表面逸入宇宙空间。

大质量恒星的中心区域温度最高，辐射率比较大，因而质量转变为辐射能的速率相应地也比较大。B0 型恒星所代表的天体的质量是太阳质量的 15 倍左右。图 1.5 所表示的是相对光度，它说明了 B0 型恒星消耗燃料的速率约比太阳快 10^4 倍。太阳在主星序上要维持 100 亿年，而预期 B0 型恒星大约只能存在 1000 万年，之后它的结构就会发生变化。O5 型星演化得还要快。因此，我们可以预料，老年恒星群只能包括位于主星序上的黄色和红色的小质量恒星。

恒星中心的氢全部耗尽时所产生的结构上的变化，应该同时引起恒星表面温度和亮度的某种改变。这时，从赫罗图上来说，恒星开始离开主星序。在银河星团英仙座 h+x（图 1.4）中我们观测到了这种运动的证据。我们看到从主星序向右方，也就是朝着温度较低的方向伸出一条曲线，而在图的右上角则出现了一群新的恒星——在这个部位所出现的必然是一些明亮的红色恒星。根据模型星以及它内部核反应过程应有的速率所做的详细计算表明，刚好位于英仙座 h+x 星团离开主星序的转折点上的恒星，其年龄不可能超过 200 万年。

相反，球状星团 M67 中的任何主序星都不会比 F 型恒星更蓝。因此，所有这些恒星都是比较小的，其中质量最大的也不会比太阳质量大很多。这种亮度的恒星大约要在 7×10^9 年时间内才能完成其中心区域内的氢燃烧过程，因而我们认为这个数字必然就代表了 M67 今天的年龄。

这个星团还有一个发展得很好的巨星分支。显然，离开主星序的恒星便朝着这一分支内移动。因为分布在这一分支上的恒星的实际数目要

比停留在主星序上的恒星来得少，由此我们推断，这些恒星在亚巨星或红巨星阶段上渡过的时间是不太长的，它们很快就会转入另外某个阶段。如果它们作为巨星时渡过的时间比较长，那么我们应该可以在赫罗图上的这一部分看到许多密集的恒星——也许会达到转折点附近主星序那样的密度。根据我们所述的观点，亚巨星和巨星毕竟全都是以前的主序星。在年龄较轻的时候，它们居住在刚好就是在现在的转折点上方的那部分主星序上。

因此，我们看到赫罗图确实是一个非常有用的工具，它不只是为我们指示了各种恒星所出现的地方，而且利用适当的理论工具我们还可以估计出某个给定恒星集团可能有的年龄，这里只要假定全部成员星都在同一时间形成。而且，即使完全不用核燃烧理论，而仅仅根据某种连续性要求，我们就能估计出恒星在不同阶段所渡过时间的相对长度，其中唯一要利用的是赫罗图上不同部分的恒星密度。

实际情况看来要比这来得复杂，因为我们最终必须要确定的是恒星在图上运动的方向以及它在不同阶段所到达的星序。对此，我们几乎完全要依靠核燃烧理论——这种理论告诉我们恒星在什么星序上把它内部的各种元素转变为另一些元素，以及在每一步过程中会释放出多少能量。

我们来看图 1.5 所表现出的另一个特性。当恒星离开主星序时它显然要变红，而且如果还有什么差别的话，那就是会变得比在主星序上更亮一些。但是，一个温度较低的天体在每单位面积上所发出的辐射量总是比较少的，因此这一特定演化过程所能够走的唯一一条途径就必然是恒星的体积随着其离开主星序而变大。同它在主星序上的大小相比，恒星现在就成了巨星，它们的半径可以增大 10 倍以至 100 倍。

让我们来看一下这些阶段是怎样演化的。

在这个问题上球状星团的研究最富有指导意义，这类星团中包含了被我们认为是银河系内某些最年老的恒星，它们

图 1.6　球状星团 M3 的颜色? 星等图，上面还标出了演化的大致路径（Jo56，Sc70）

又暗又红的转折点说明了这一点。大体上说，每个给定星团中的恒星差不多是同时形成的；因而转折年龄就代表了星团的年龄。图 1.6 是球状星团 M3 的颜色? 星等图，图上不仅可以看到亚巨星和红巨星分支星族，而且可以看到水平分支星族。图上还可以看到水平分支上的赫兹伯仑空隙，该处的 B? V 值约为 0.3。恒星是怎样沿着这些分支演化的呢？它们朝哪个方向运动？它们又怎样会越过一个空隙，以至在那儿就没有任何恒星出现呢？

当恒星停留在主星序上时，它的外貌确实发生了极其微小的变化，线段 AB 反映了这种变化的情况。图上表示的这段距离所涉及的寿命大约是 10^{10} 年。恒星从 A 点起开始在主星序上生活，然后就慢慢地朝 B 点移动，在这个过程中它变得稍为红一些，也稍为亮一些。举个例子来说，太阳就必然在经历着这样一种变化。不但我们已经对这个过程了解得比较清楚，同时，反映最近几十亿年历史的地质学和古生物学记录可能也证实了太阳在亮度上所发生的类似的变化。

到达 B 点时，恒星中心的氢已经用完，形成一个燃料用空了的中央核，而由氢向氦的转变则仅仅在这个核周围的一个壳层中进行。在第一红巨星阶段中恒星从 B 点运动到 C 点，其主要能源就是这种氢的壳燃烧。燃烧着的壳层向外运动，同时把更多的氢转变为氦，而氦核的质量则慢慢地增大（见图 8.8）。

在 C 点，大质量的核由于收缩而加热，温度升高到足以使氦转变为碳。这个过程进行得极为迅速，我们称之为氦闪。在氦闪过程中约有 3% 的核参与燃烧，而核的总质量约为 $0.5M_{\odot}$。核在这一过程中被加热到足以能克服引力的作用而发生膨胀，同时，核的氦燃烧继续进行，而核内的物质作对流状的搅拌运动。

有趣的是在氦闪期间，核内的能量转换率可能等于一个星团中全部恒星所释放出来的总能量。但是，这些能量不可能一下子到达恒星的表面，实际上就是这部分能量在促使被强大的引力所束缚着的核发生膨胀。

我们相信，环 DE 与水平分支的恒星有关，它代表了演化过程中的一个阶段，在这一阶段中主要能源来自核的氦燃烧，同时壳层中的氢燃烧也在进一步向外扩展。从 D 演化到 E 大约延续 10^8 年，而从 B 演化到 C 的时间也许还要长一些。图 1.6 表明，C 到 D 这一阶段所经历的时间一定非常短促，因为在那儿出现的 M3 成员星为数甚少。

到达 E 点时，核中的氦已经耗尽，而氦的壳燃烧便开始出现。线段 EF 代表了这样一个演化阶段，在这个阶段中的恒星由以下几部分组成：一个不活泼的碳？氧核，核的周围有一个氦燃烧壳层，再往外依次是一层还没有进行下一步核转变的氦带和一个氢燃烧壳层，最外面是一层由生成恒星的原始物质所构成的外壳，外壳中的物质没有经历过任何的核转变。因此，即使已经处于现在这样的演化高级阶段，从我们实际上唯一所能观测到的恒星最外层的化学组成，还是一点也看不出恒星内部所经历着的种种复杂变化。

EF 是第二红巨星阶段，这一阶段中的恒星在赫罗图上的演化路径几乎和前面从 C 到 D 所绘出的曲线，以及从 B 到 C 的轨迹的顶部完全一样，这三组不同的恒星从外表看来是很类似的。

请注意，恒星生成时氦的初始浓度，也许能够从 D 到 E 所组成的这个环来加以确定，这一点是很有意义的。恒星演化理论预言，初始氦含量低的恒星应该在环上部返向 E 点的过程中度过比较长的时间。我们可以预期大部分氦丰富度在 10%左右的恒星应集中在环的左端。另一方面，初始氦丰富度为 20～30%的恒星在水平分支上向左的运动速度开始非常快，随后就慢慢地向左移动，甚至会停留在拐角的附近。一旦到达环的顶部，它们便迅速地向 E 点运动。我们所观测到的球状星团中水平分支恒星的分布情况，同氦丰富度高达 30%左右的恒星符合得非常之好（Sc70）。

这样高的初始氦丰富度尽管带来了很有意义的结果，然而同时也引起了许多新的问题。这么高的丰富度是不是就代表了最早的原初物质，而宇宙间的一切物质都是由这种物质生成的呢？或者，在某个更早的历元，是不是存在一个由氢向氦转变的阶段，而这一阶段甚至出现在银河系内我们所知道的最早的恒星形成之前呢？如果是这样的话，那么这一

过程是星系形成阶段的一部分吗？或者它是代表了星系形成前某一阶段中的一种宇宙现象吗？我们要从不同的角度对这一问题进行若干次讨论。但是，我们也不得不承认，对此还不能作出任何明确的回答，这个问题仍然是天体物理学中一个未予解决的难题。

关于氦的壳燃烧过程，迄今尚未提及的一个特征就是这种燃烧不是平稳地发生的，而是有点以一系列氦闪的方式在进行——正象氢的核燃烧是在一次氦闪中进行的一样。在壳燃烧的每次氦闪中，峰值光度可达$10^5L_\odot$左右。至少在有些模型星中存在一些迹象，表明这种壳层氦闪会使恒星离开红巨星分支而作某种环状的运动，先向左，然后又回来，一来一回大约要 10^3 年时间。这种运动使得恒星进入赫罗图上由星族Ⅱ造父变星所占有的部位，因而很可能这种脉动星应该同壳层内氦闪燃烧过程联系在一起。这是一个亟须进一步研究的问题。

同样，我们也很需要对行星状星云有更多的了解，这种天体有一颗炽热的中央星，周围是一个由抛射物质所组成的壳层，因为我们知道有一个行星状星云存在于一个球状星团之中，至少来说，很可能这一颗中央星的质量只比该星团内位于主星序转折点处恒星的质量稍为大一些。这一点使得我们考虑把行星状星云阶段同刚才所讨论的红巨星阶段之后的某个阶段联系起来。可能的情况是，演化到图 1.6 中路径 EF 所描述的那个阶段的一颗恒星会出现一个不稳定区域，它经过一次或数次猛烈的爆炸后便把外层物质抛了出去，结果使介于氢和氦这两个燃烧壳层之间的某个地方以外的恒星外部壳层分离开来。于是，恒星的中央部分便只是一个质量较小的、富有碳和氧的核，这个核慢慢地朝着赫罗图上所示的白矮星阶段收缩（图 1.5）。最初，行星状星云的中央星显得非常炽热而又明亮，图 1.5 中所画的那个环表明了这一点。但是，后来它就朝着白矮星所处的部位冷却下来。处于这一阶段的白矮星质量也许不会超过～$0.7M_\odot$，其余部分的质量已在爆炸过程中抛了出去，并形成了行星状星云的气体外壳（Sa68b）。

形成行星状星云的这一图象可能会引起许多异议。预期质量和所观测到的抛射质量是否相符的问题还没有搞清楚。还有，在抛射物质的化学组成中，预期重元素（或者至少是氦）的浓度可能会比较高，但是这一点看来与观测结果不符。很显然，我们对恒星演化中的这一阶段的认识仍然是十分肤浅的，不过这一问题极有希望在接下来的一些年内得以解决。

关于爆发星，也就是新星和超新星，同样会引起一些类似的问题。这类爆发事件很可能同充分演化后恒星的致密核内的中微子发射（Sa69b）有着某种很密切的关系。中微子损失使恒星中央部分发生收缩，而同时温度却没有显著的升高。中微子相互作用截面是很小的，这就使能量很容易从坍缩中的核向外输送出去。于是就导致迅速收缩的内核同发生中微子电子散射的外部发生分离，能量必然就在外层中积累起来，结果终于引起剧烈的爆炸。为使这一过程得以发生，甚至要求外层最初必须坍缩到密度在 10^{11} 克·厘米$^{-3}$ 左右；这时，恒星的半径就只有 100 公里。

在这种情况下，抛射物质可能就成为一次超新星爆发中的观测对象，而收缩中的核也许会演化为一颗中子星。

需要全本请访问 www.ertongbook.com