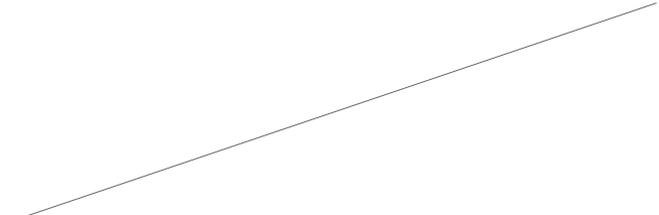


第三章



星海拾贝

“天地玄黄，宇宙洪荒，日月盈昃，辰宿列张。”

——千字文

第 11 节 恒星也有生老死 太阳尚在中青年

宇宙是如此浩渺，但人造物体能够到达的，还主要仅限于太阳系这个大家庭内部，这些人造物体丰富和加深了我们对太阳及其八大行星的知识。

古人望着满天繁星说：“天上一颗星，地上一个人”。他们将星星看作是地球上人的化身，用心目中的英雄人物为最亮的星座命名。如今的孩子们，早就知道了星星并不是人，他们要问的问题可能是：“星星是不是也有生老病死呢？”

的确，星星和人一样，也有生老病死。不过，星星的寿命要比人类个体的寿命长得多，经常需要以“亿年”为单位来计算！

从天文观测的角度看，恒星会主动发光，而行星只是被动地反射

或折射恒星发出的光线而已。恒星的质量较大，它们“心中燃着一把火”，它们的生命过程轰轰烈烈、多姿多彩。科学家们将各类恒星的诞生、演化，直至死亡的整个过程，称之为“恒星的演化周期”。根据恒星质量的不同，它们的演化周期(寿命)也大不相同。一般而言，恒星质量越小寿命越长，从几百万年到数兆年不等。

那么，首先让我们考察一下我们这个大家庭的主人，离我们最近的恒星——太阳。太阳诞生于何时？经历了什么样的生命周期？它还能照耀多久呢？太阳的“生死”决定了大家庭成员们的生死，也与我们地球上人类的生存息息相关，千万不可小觑。

目前的太阳几乎是一个理想球体，从中间向外依次为核心区、辐射区和对流区(图 11-1(b)左上太阳内部截图)。恒星发光的原因是因为它们内部有热核反应，太阳也是如此。公众熟知的核反应例子是世界上一些大国掌握的核武器：原子弹和氢弹。前者的物理过程叫作“核裂变”，后者则叫作“核聚变”。裂变指的是一个大质量的原子核(例如铀)分裂成两个较小的原子核，聚变则是由较轻的原子核(例如氢)合成为一个较重的原子核，比方说氢弹便是使得氢在一定条件下合成中子和氦。无论是裂变还是聚变，反应前后的原子核总质量都发生了变化。爱因斯坦的狭义相对论认为质量和能量是物质同一属性的不同表现，它们可以互相转换。在两类核反应中都有一部分静止质量在反应后转化成了巨大的能量，并且被释放出来，这就是核武器具有巨大杀伤能力的原因。太阳内部所发生的，是与氢弹原理相同的核聚变。

核聚变要求的条件非常苛刻，需要超高温和超高压。人为地制造这种条件不是那么容易，虽然人类已经有了氢弹，但那是一种破坏

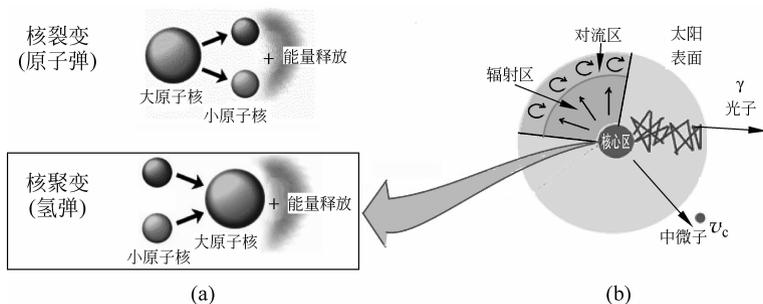


图 11-1 太阳内部的核聚变反应
(a) 核反应；(b) 太阳中心的热核聚变

性的、对付敌人的武器，要想办法控制这种能量而加以和平利用，仍然是困难重重。可是，在太阳的核心区域中却天然地提供了这一切难得的条件。那里的物质密度很高，大约是水密度的 150 倍，温度接近 $1.5 \times 10^7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因此，在太阳核心处进行着大量的核聚变反应。

太阳内部的热核反应会产生大量能量极高的伽马射线，这是一种频率比可见光更高的光子，同时也产生另外一种叫作中微子的基本粒子。因而，在我们的宇宙中，不仅飞舞着各种频率的光子（电磁波），也飞舞着大量的中微子！中微子字面上的意思是“中性不带电的微小粒子”，是 20 世纪 30 年代才发现的一种基本粒子。中微子有许多有趣的特性，有待人们去认识和研究。比如说，科学家们原来以为中微子和光子一样没有静止质量，但现在已经认定它有一个很小很小的静止质量。

如图 11-1(b)所示，光子从太阳核心区出来后的轨迹弯弯曲曲，平均来说，要经过上万年到十几万年的时间，才能从太阳核心区到达太阳的表面，并且从伽马射线变成了“可见光”，继而再飞向宇宙空

间。中微子的行程则是直的，两秒钟左右便旅行到了太阳表面，并且逃逸到太空中去了。

无论如何，太阳系大家庭的有用能量之来源是太阳核心区的核反应。聚变反应的每一秒钟，都有超过 $4 \times 10^6 \text{ t}$ 的物质（静止质量）转化成能量。如此一来，科学家们不由得担心起来：太阳以如此巨大的速度“燃烧”，还能够烧多久呢？简单的计算可以给我们一个近似的答案。太阳的质量大约是 $2 \times 10^{27} \text{ t}$ ，每秒钟烧掉 $4 \times 10^6 \text{ t}$ ，每年大约要烧掉 10^{14} t 。因此，如果太阳按照这个速度进行核反应，大约还能燃烧 10^{13} 年，即 100 亿年。这个结论只是粗略的估算，太阳具体的演化过程，可参考图 11-2。

恒星的生命周期和演变过程取决于它最初的质量。大多数恒星的寿命在 10 亿岁到 100 亿岁之间。粗略一想，你可能会认为质量越大的恒星就可以燃烧更久，因而寿命更长。但事实却相反：质量越大寿命反而越短，质量小的（矮子）细水长流，命反而长。比如说，一个质量等于太阳 60 倍的恒星，寿命只有 300 万年，而质量是太阳一半的恒星，预期的寿命可达几百亿年，比现在宇宙的寿命还长。

图 11-2 显示了恒星诞生后的演化过程。太阳是在大约 45.7 亿年前诞生的，目前“正值中年”。太阳在 45 亿年之前，是一团因引力而坍缩的氢分子云。科学家们使用“放射性测年法”得到太阳中最古老的物质是 45.67 亿岁，这点与估算的太阳年龄相符合。

恒星自身的引力在演化中起着重要的作用。世界万物之间存在的引力使得两个质量互相吸引。一个系统中，如果没有别的足够大的斥力来平衡这种吸引力的话，所有的物质便会因为引力吸引而越来越靠近，越来越紧密地聚集在一起。并且，这种过程进行得快速而

猛烈,该现象被称为“引力塌缩”。在通常所见的物体中,物质结构是稳定的,并不发生引力塌缩,那是因为原子中的电磁力在起着平衡的作用。

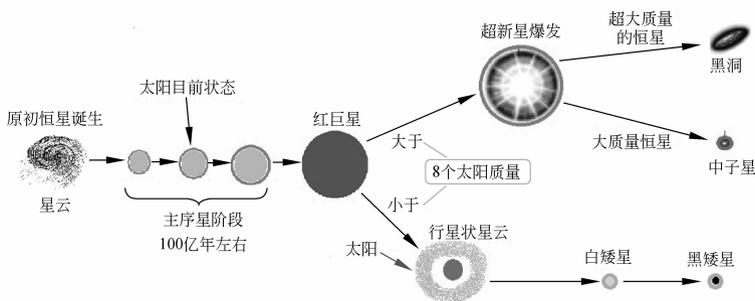


图 11-2 恒星的生命周期(彩图见后)

在恒星形成和演化过程中存在引力塌缩。所有恒星都是从分子云的气体尘埃坍缩中诞生的,随之凝聚成一团被称为原恒星的高热旋转气体。这一过程也经常被称为引力凝聚,凝聚成了原恒星之后的发展过程则取决于原恒星的初始质量。太阳是科学家们最熟悉的恒星,所以在讨论恒星的质量时,一般习惯将太阳的质量看成是1,也就是用太阳的质量作为质量单位。

质量大于 $1/10$ 太阳质量的恒星,自身引力引起的塌缩将使得星体核心的温度最终超过 1 千万 $^{\circ}\text{C}$,由此启动质子链的聚变反应,氢融合成氦,再合成氦,大量能量从核心向外辐射。当星体内部辐射压力逐渐增加并与物质间的引力达成平衡之后,恒星便不再继续塌缩,进入稳定的“主序星”状态。我们的太阳现在便是处于这个阶段,如图 11-2 所示。

质量太小(小于 0.08 倍太阳质量)的原恒星,核心温度不够高,启动不了氢核聚变,就最终成不了恒星。如果还能进行氦核聚变的话,便可形成棕矮星(或称褐矮星,看起来的颜色在红棕之间)。如果连棕矮星的资格也够不上,便无法自立门户,最终只能绕着别人转,变成一颗行星。

太阳的主序星阶段很长,有 100 亿年左右。到目前为止,太阳的生命刚走了一半。并不是所有恒星的生命演化过程都和太阳一样,恒星最后的归宿是什么? 主要取决于恒星的质量。从主序星到红巨星阶段,大家的过程差不多,后来则因为质量不同而走了不同的路,见图 11-2。分叉点是在“8 倍太阳质量”之处,对应于“钱德拉塞卡极限”。这个界限值是由印度物理学家钱德拉塞卡在 20 多岁时发现的,他为此而在 70 多岁时荣获诺贝尔物理学奖。

图 11-2 中向下的分岔是质量小于 8 倍太阳质量的恒星演化过程,也就是我们太阳将来要走的路。太阳在主序星阶段中,温度将会慢慢升高。当它 100 亿岁左右时,核心中的氢被烧完了,但是内部的温度仍然很高,就开始烧外层的氦。于是,太阳会突然膨胀起来,体积增大很多倍,形成红巨星。经过了红巨星之后,可以进行聚合反应的元素燃烧完了,星体慢慢冷却下来,继续塌缩,体积从红巨星大大缩小,星体中的物质以离子和电子云的状态存在。电子是费米子,遵循泡利不相容原理,任何两个电子都不能处于完全同样的状态。然而,逐渐缩小的星体体积却力图迫使它们处于相同的(简并的)状态,如此便会在星体中产生一种“电子简并压”与引力塌缩作用相抗衡。也就是说,引力塌缩的作用要使星体体积越变越小,而电子简并压则使得星体体积增大,才能有更多的空间容纳更多的电子状态。两者在

某个点取得平衡,形成白矮星。这里我们用“矮”字来表示那种体积小但质量大的星体。天文学中有 5 种小矮子:黄矮星、红矮星、白矮星、褐矮星、黑矮星。白矮星白而不亮,还能够慢慢散发出暗淡之光,延续若干亿年,最后什么光都没有了,变成黑矮星。这便是这一类质量小于 8 倍太阳质量的恒星(包括太阳)的归宿。

质量大于 8 倍太阳质量的恒星,后来的结局有所不同。它们内部的引力太大了,压抑太厉害了爆发起来也厉害。爆发成了一个红巨星还不能使它们过瘾,紧接着又爆发成一颗亮度特大的超新星。超新星之后才慢慢冷却,内部的巨大引力使得其中的物质继续塌缩。这次塌缩的结果又会是什么呢?即使经过了与白矮星类似的电子简并压阶段,但因为质量太大,电子简并压抗衡不了引力以达到新的平衡。那么最后,物质将塌缩到哪里去呢?这些问题困惑着 20 世纪二三十年代的物理学家们。当时从实验中已经发现了电子和原子核,但中子尚未被发现。后来,实验物理学家发现并证实了“中子”的存在,证明物质是由电子、质子和中子组成的。这个消息立即传到了哥本哈根,量子力学创始人波尔(1885—1962)召集讨论,正好在那里访问的著名苏联物理学家朗道(1908—1968)立刻将这个发现与恒星塌缩问题联系起来。朗道敏锐地认识到,质量大于 8 倍太阳质量的恒星,将塌缩成为“中子星”。也就是说,巨大的引力作用,将使得电子被压进氦原子核中,质子和电子将会因引力的作用结合在一起成为中子。中子和电子一样,也是遵循泡利不相容原理的费米子。因此,这些中子在一起产生的“中子简并压”力,可以抗衡引力使得恒星成为密度比白矮星大得多的稳定的中子星。

中子星的密度大到我们难以想象: $10^8 \sim 10^9 \text{ t/cm}^3$ 。

不过,恒星塌缩的故事还没完!后来在“二战”中成为与原子弹有关的“曼哈顿计划”领导人的奥本海默,当时也是一个雄心勃勃的年轻科学家。他想:白矮星质量有一个钱德拉塞卡极限,中子星的质量也应该有极限啊。一计算,果然算出了一个奥本海默极限。超过这个极限的恒星应该继续塌缩,结果是什么呢?如同图 11-2 右上方所显示的,这种超大质量恒星最后将塌缩成一个“黑洞”。有关黑洞,我们将在后面介绍。

虽然科学家们在 20 世纪 30 年代就预言了中子星,甚至黑洞,但是真正观测到类似中子星的天体却是在 30 多年之后。

中子星和白矮星都是已经被观测证实存在于宇宙中存在的“老年”恒星。天文学家们也观测到很多黑洞,或者说观测到的是黑洞的候选体。将它们说成是“候选”的,是因为它们与理论预言的黑洞毕竟有所差别。例如,离地球最近的孤立中子星位于小熊星座,被天文学家取名为“卡尔弗拉”(Calvera)。这种中子星没有超新星爆发产生的残余物,没有绕其旋转的星体,因为发出 X 射线而被发现。

太阳的最后“归宿”是白矮星。但是,我们中的任何人都等不到那一天,好几十亿年,实在太长了!不过,银河系中如此多的恒星给我们展示了这两种星星的样板。在离太阳系大约 350 光年远的地方,有一对有趣的联星系统,正好由一颗红巨星和一颗白矮星组成,它们的英文名字叫“Mira(A 和 B)”。Mira 的中文名是蒭藁增二,来自中国古代的星官名。

前面的章节中说到人类社会中的各个大国正在进行太空争夺战。十分有趣的是,宇宙中的各个天体之间,也在进行着无言的、永恒的争斗。天体之间最基本的力是引力,但很多天体周围都有电磁

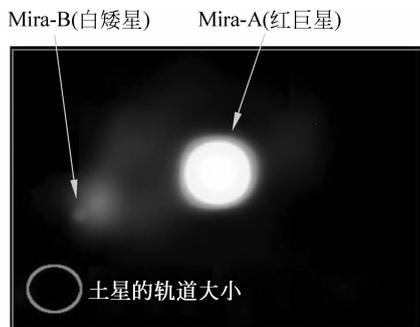


图 11-3 Mira-A 和 Mira-B(图片资料来自 NASA)

场,因此星体间的电磁作用有时也起主导作用。在这两种长程力的作用下,天体之间互相影响,互相制衡,形成宇宙中一幅十分有趣的物理图景。

地球和太阳间的电磁场也有“搏斗”,欲知它们如何搏斗,且听下回分解。

第 12 节 大伞撑起地磁场 变幻莫测太阳风

太阳的活动情形与人类在地球上的生存环境息息相关,因此,太阳自然地成为人类航天计划最重要的探索目标。20 世纪 90 年代,以“尤利西斯号”(Ulysses)、太阳和月球层探测器(Solar and Heliospheric Observatory, SOHO)等为代表的一系列太空飞船的任务,还有最近的欧洲空间局与中国科学院合作的“SMILE”计划,目标都是直指太阳以及地球附近空间的辐射带。

俗话说得好:“万物生长靠太阳”。太阳发光又发热,供给地球