

核科技知识丛书

核天体物理

——探索星系演化和元素起源的交叉学科

郭冰 柳卫平 李志宏 等 编著



中国原子能出版社
China Atomic Energy Press

|核|科|技|知|识|丛|书|

核天体物理

——探索星系演化和元素起源的交叉学科

郭冰 柳卫平 李志宏 等 编著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核天体物理:探索星系演化和元素起源的交叉学科 /
郭冰等编著. —北京:中国原子能出版社, 2017.4
ISBN 978-7-5022-8015-4

I. ①核… II. ①郭… III. ①核物理学—普及读物
②天体物理学—普及读物 IV. ①O571-49 ②P14-49
中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第084653号

核天体物理——探索星系演化和元素起源的交叉学科

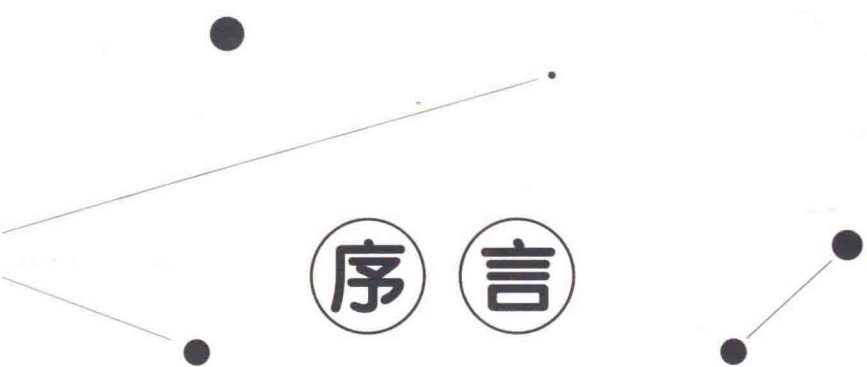
出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路43号 100048)
特约编辑 金 铮 李泉雄 范淳钰
责任编辑 张 琳
责任校对 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 北京盛通印刷股份有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 880 mm × 1230 mm 1/32
印 张 1.875 字 数 34千字
版 次 2017年5月第1版 2017年5月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-8015-4 定 价 23.00元

网址: <http://www.china-nea.cn/>

E-mail: atomep123@126.com

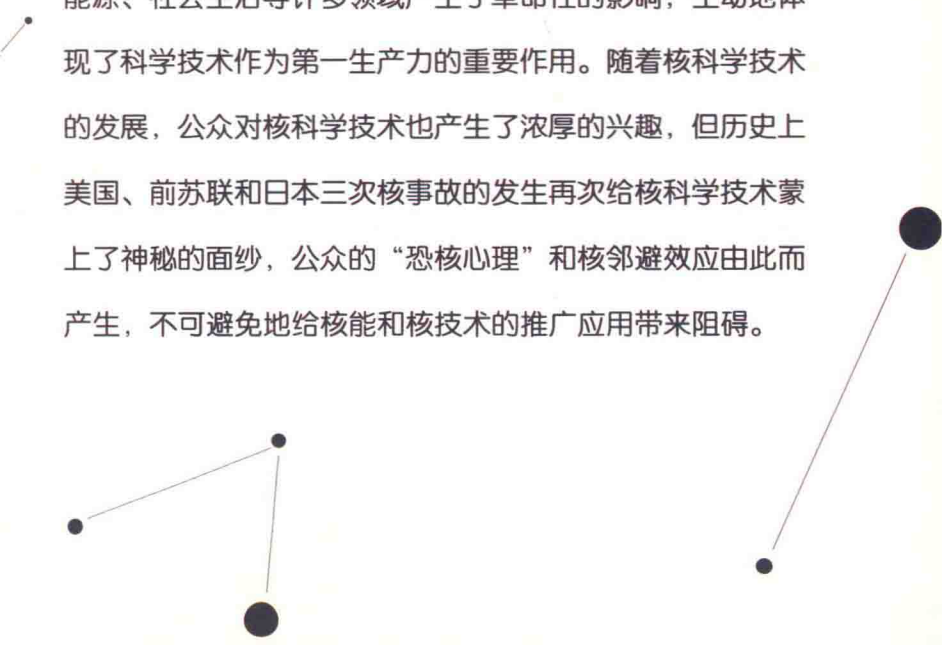
发行电话: 010-68452845


版权所有 侵权必究



序 言

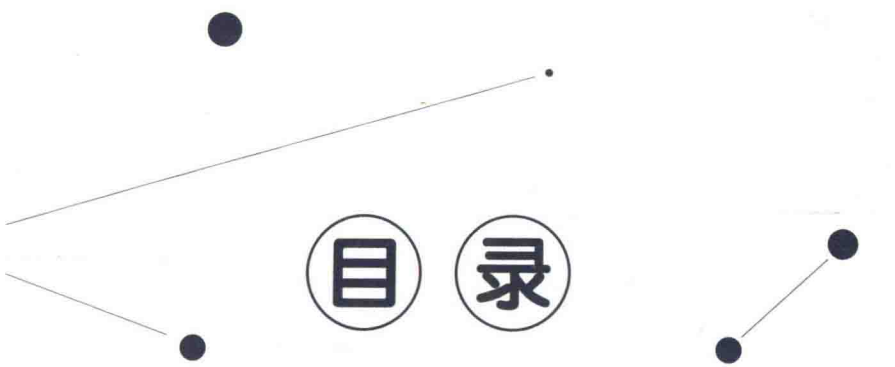
核科学技术的出现、发展和应用是人类科技史上取得的重大成就，为我们打开了微观世界的大门。20世纪40年代以来，核科学技术理论体系逐步完善，核科技工业也随之发展起来，人类进入了开发和利用核能的新时代，核能在军事、能源、社会生活等许多领域产生了革命性的影响，生动地体现了科学技术作为第一生产力的重要作用。随着核科学技术的发展，公众对核科学技术也产生了浓厚的兴趣，但历史上美国、前苏联和日本三次核事故的发生再次给核科学技术蒙上了神秘的面纱，公众的“恐核心理”和核邻避效应由此而产生，不可避免地给核能和核技术的推广应用带来阻碍。





习近平总书记在2015年中国核工业创建六十周年之际指出，核工业是高科技战略产业，是国家安全的重要基石，要坚持安全发展、创新发展，坚持和平利用核能，全面提升核工业的核心竞争力，续写我国核工业新的辉煌篇章。为了更好地贯彻总书记的指示精神，做好民族自强的核脊梁，核工业人要自觉地张开核科技创新、核科学普及的“双翼”。一方面要进一步提高核安全保障和自主创新能力，勇于担当，积极推动核工业由大变强；另一方面要进一步加强核科普工作，提升核科学技术知识的普及率，让更多人科学而理性地认识、了解和接受核科学技术，从而为核工业的发展营造良好的社会氛围。

为此，中国核工业科技馆组织编写了核科普系列丛书，邀请相关领域的专家通过较为通俗易懂的语言介绍核科学技术的相关知识，希望希望引导公众科学、客观的了解核及其应用领域，尽力减少由于“不理解”而引发的误解。在此，对参与本套丛书编写的单位和专家表示衷心的感谢！



目 录

一、核天体物理研究什么?	01
二、宇宙大爆炸	04
三、恒星的诞生和演化	08
四、恒星能量来自何方?	17
五、宇宙中的元素起源	25
六、太阳中微子	31
七、我国实验核天体物理发展现状	38
八、核天体物理发展展望	45
参考文献	48
后记	51



一、核天体物理研究什么？

在未来的某个时间，由于气候和环境的急剧恶化，地球已濒临灭亡，人类需要紧急寻找新的居住地。作为拯救人类未来计划的一员，主人公要进行星际旅行，去寻找满足人类居住条件的其他星球——这是电影《星际穿越》中的剧情。在星际旅行中，主人公们遇到了宇宙中最神秘的天体——黑洞。作为宇宙中最黑暗、质量最密集的天体，黑洞激发了人们巨大的想象力，为众多科幻小说和电影提供了精彩的素材。黑洞的引力之强已经远远超出了人类的认知范围，只要与黑洞接近到一定距离（视界），包括光在内的任何物质都无法逃离它的引力。那么黑洞是如何形成的呢？它将如何影响宇宙的演化呢？

在电影《2012》中，太阳活动突然加剧，释放出的大量中微子把地核加热熔化，使得地球板块发生漂移，最终引发剧烈的火山爆发和超级大海啸。当然，这只是电影中的科学幻想。中微子非常神秘，由于它具有极强的穿透能力而被称

为“宇宙的信使”，它几乎不与物质发生任何相互作用，甚至每秒钟有50万亿个中微子穿过人体，而我们毫无感觉。中微子性质为何如此奇特，它们是如何产生的，又将如何影响恒星乃至宇宙的演化？

浩瀚无垠的宇宙中有无数闪闪发光的恒星，除了太阳以外，其他恒星都远离地球，然而人们在地球上通过肉眼就可以看到的恒星仍达到六七千颗。它们发光发热并照亮宇宙的巨大能量来自何方？更令人好奇的是，构成我们丰富多彩的物质世界的九十多种元素的产生与这些遥远的天体到底有什么神秘的关联？科学家是否有可能在地球上模拟恒星及宇宙的演化？

要找到这些问题的答案，我们需要了解天体环境中发生的核物理过程，它不仅为恒星照亮宇宙提供能量，也是自然界所有化学元素赖以生成的“炼金术士”。我们存身的太阳系、地球，乃至我们人类自己都是天体核过程炮制的产物。“我们都是由星际尘埃组成的”，美国科学家卡尔·萨根（Carl Sagan）如是说。

探索这一奇妙过程及其内在规律的学科称为核天体物理，它将研究微观世界的核物理与研究宏观世界的天体物理、天文学融合起来，在极小和极大尺度的物质之间架起了一座桥梁，从而阐释恒星乃至宇宙中发生的纷繁复杂的奇妙现象。核天体物理是一门令人振奋的重要交叉学科，在国际上一直作为物理学的一个重要前沿方向而备受关注。

我们目前对于恒星演化和元素起源复杂过程的认知是

核物理学家、天体物理学家和天文学家近一个世纪密切合作的结果。这些科学家为研究宇宙和我们所在星系的演化做出了艰辛的努力和巨大的贡献，促进了核天体物理学的形成和发展。相关领域至今已有多项成就先后获得了诺贝尔物理学奖。图1给出了核天体物理研究过程的示意图。通过原子核理论和实验获得的核反应截面（代表原子核间发生核反应的概率）、衰变半衰期（不稳定原子核数衰减到原来数目的一半所需的时间，代表原子核的稳定性）以及原子核质量等作为核物理输入量，与天体物理理论和天文观测数据一起输入到天体演化模型中进行大型计算机模拟，预言天体演化中元素的丰度。通过比较预言值和天文观测结果，可以研究是否存在新的物理规律，验证人类对天体演化的理解是否正确。



图1 核天体物理研究过程的示意图

二、宇宙大爆炸

让我们回到宇宙创生的原点，宇宙始于一个极致密、极炽热的奇点，在138亿年前的一次大爆炸后膨胀形成。奇点是宇宙大爆炸之前宇宙存在的一种形式，它具有一系列奇异的性质，如无限大的物质密度、无限弯曲的时空等。大爆炸之初，宇宙中的物质只能以基本粒子的形态存在。基本粒子是构成物质的最基本的单元，包括费米子和玻色子两大类。费米子是构成物质实体的粒子，玻色子是传递力或能量的粒子。宇宙的不断膨胀导致温度和密度很快下降，进而逐步形成原子核、原子、分子，并复合成为气体。气体逐渐凝聚成星云，星云进一步形成各种各样的恒星和星系，最终形成我们今天所看到的宇宙（图2）。这是大爆炸理论对宇宙演化的预言。

1922年，前苏联物理学家弗里德曼首次阐述了爱因斯坦（Einstein）的引力场方程存在非静态的解，推导出宇宙是一个从未停止变化的动态宇宙，从而他引入了“宇宙膨胀”这

个词。这就是早期的宇宙膨胀理论。

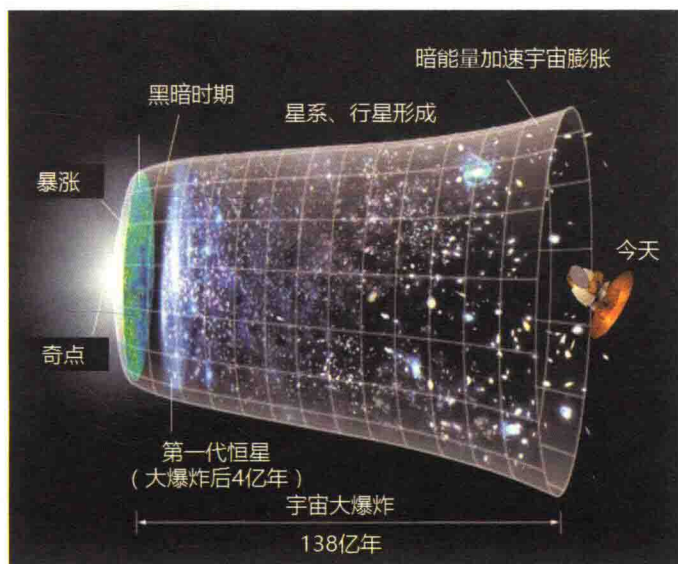


图2 宇宙演化示意图（基于NASA原图修改而成）

宇宙膨胀理论提出之后的很长一段时间内，科学界对其“不屑一顾”。爱因斯坦也对这个理论持怀疑态度，他认为动态宇宙是不合理的，于是便在引力场方程中又强加了一个“宇宙常数”，以维持静态宇宙的计算结果。

英国天文学家霍伊尔（Hoyle）也是宇宙膨胀理论的反对者，他提出稳恒态宇宙模型。有意思的是，大爆炸理论的名称却是来自霍伊尔，他在1949年3月的一期BBC广播节目《物质的特性》（The Nature of Things）中将宇宙膨胀理论称作“这个大爆炸的观点”。令人意想不到的是，“大爆

炸”这个形象的词语，为在公众中推广这个理论做出了巨大的贡献。有很多通俗轶事中记录霍伊尔这样讲是出于讽刺，但霍伊尔本人否认了这一点，他声称这只是为了着重说明这两个模型的显著不同之处。

1929年，美国天文学家哈勃（Hubble）通过光谱分析发现一个惊人的现象：不管你往哪个方向看，远处的星系正急速地远离我们而去，这就是谱线红移（即波长变长）现象。换言之，宇宙正在不断膨胀。这意味着，以前的星体之间更加靠近，过去的宇宙一定要比现在更小、更热而且更稠密。如果追溯到足够遥远的过去，就会发现在某一个时刻，宇宙中所有的物质刚好在同一地方，所以哈勃的发现暗示存在一个创生宇宙的初始时刻。听闻此事的爱因斯坦很快来到哈勃工作的威尔逊天文台，在哈勃的带领下亲自观测了星系的谱线红移现象。访问结束后，爱因斯坦公开承认了自己主观意识影响科学结论的错误，并去掉了场方程中的宇宙常数，于是就有了我们今天所熟知的爱因斯坦场方程。谱线红移现象的发现是对宇宙大爆炸理论的一个非常有力的支持，从此天平逐渐从稳恒态宇宙模型向大爆炸理论倾斜。

第二次世界大战以后，大爆炸理论得到进一步的支持和完善。1948年，前苏联物理学家伽莫夫（Gamow）和他的博士生阿尔弗（Alpher）提出原初核合成理论。按照这一理论，宇宙起源于一个高温、高密度的“原始火球”，随着宇宙的急速膨胀，宇宙温度逐渐降低，并生成了氢和氦等几种元素。伽莫夫提出的理论很好地解释了所观测到的宇宙中

的氦元素含量，这为大爆炸理论提供了又一有力的证据。后来，获得博士学位的阿尔弗和同事赫尔曼（Herman）合作，从理论上预言了宇宙微波背景辐射的存在。

1964年，美国贝尔电话公司的年轻工程师——彭齐亚斯（Penzias）和威尔逊（Wilson），为改进卫星通讯建立了高灵敏度的接收天线。有一天，他们在调试天线时测量到一种无线电干扰噪声。他们想了许多办法，但是始终无法去掉这种噪声。在转动天线时，噪声强度保持不变，因此这种噪声肯定不是来自人造卫星，也不可能来自太阳、银河系或某个河外星系的射电源。经过详细分析和计算，他们推断出：这个噪声实际上是温度近于2.7K的黑体辐射，通常称为3K背景辐射。这正是大爆炸理论预言的宇宙演化到今天仍然残留的微波背景辐射。这一发现是对宇宙大爆炸理论的又一个非常有力的支持，是继1929年哈勃发现星系谱线红移之后的又一个重大的天文发现。彭齐亚斯和威尔逊为此获得了1978年诺贝尔物理学奖。

由上面的简略介绍可以看出，大爆炸理论已经得到了星系谱线红移、氦原子核的丰度以及宇宙微波背景辐射等可靠的实验验证，说明了宇宙大爆炸理论是正确的。

三、恒星的诞生和演化

恒星是宇宙中最重要的天体之一，许多奇妙的现象与恒星密切相关。研究恒星可以让我们认识宇宙、了解生命的本源，可以服务生产生活（如历法），也可以为解决人类能源危机提供思路（如受控核聚变）。那么，它们是如何诞生和演化的？最终归宿又是什么呢？

恒星是如何诞生的？

如果把大爆炸后最初几分钟的宇宙比作天空中的水蒸气的话，那么接下来宇宙的演化和恒星的形成就像水蒸气变成云，云又形成雨的过程。图3给出了恒星的诞生过程。随着宇宙温度的降低，宇宙中游离的原子聚集在一起形成了冷而密的巨分子云。一个星系中大多数空间的密度是每立方厘米大约0.1到1个原子，但是巨分子云的密度是每立方厘米数百万个原子。一个巨分子云的质量通常是太阳质量的数十万到数千万倍，直径大约为几十到几百光年。在星云中，一小团

尤为致密的气体尘埃云（云核）在自身的重力下开始坍缩，碎裂成多个恒星胚胎。每一个胚胎都会形成原恒星并吸积周围的气体和尘埃。随着原恒星在自身重力下不断坍缩，导致它内部温度不断升高，直到达到热核聚变的点火温度，这时聚变释放出的巨大能量将阻止星体的进一步坍缩并使它持久地对外辐射光和热，原恒星成为一颗恒星。



图3 恒星的诞生（基于Scientific American原图修改而成）

一部分非常不幸的原恒星（质量小于 0.08 倍太阳质量），由于自身引力不足导致它们的温度无法升高到足以开始热核聚变的程度，它们会成为褐矮星，又被称为“失败的恒星”，迎接它们的命运只是在数亿年的时光中慢慢变凉。不同于“倒霉”的褐矮星，大部分原恒星的质量足够大，随着引力坍缩，它的中心温度会升高到一千万度，这时氢被瞬间“点燃”并聚变成氦，恒星开始自行发光。核芯的热核聚变会产生足够的能量来阻止恒星自身的引力坍缩，达到一个动态平衡，从此恒星进入一个相对稳定的阶段。如果恒星

附近仍有残留巨分子云碎片，那么这些碎片可能会在一个更小的尺度上继续坍缩，成为行星、小行星和彗星等行星际天体。如果巨分子云碎片形成的恒星足够接近，那么可能会形成双星系统或聚星系统（两颗以上恒星聚集在一起组成的系统），也就是：多颗恒星非常接近，以致它们将相互影响对方的演化。

恒星是如何演化的？

恒星的演化分为两大类：孤立恒星和双星系统。

在天体物理学中，赫罗图（Hertzsprung-Russell diagram）是研究孤立恒星演化最重要的工具之一，它是丹麦天文学家赫茨普龙（Hertzsprung）和美国天文学家罗素（Russell）分别于1911年和1913年各自独立提出。赫罗图是恒星的光谱类型与光度之关系图，赫罗图的纵轴是光度与绝对星等，而横轴则是光谱类型及恒星的表面温度，从左向右递减。图4就是一张典型的赫罗图。

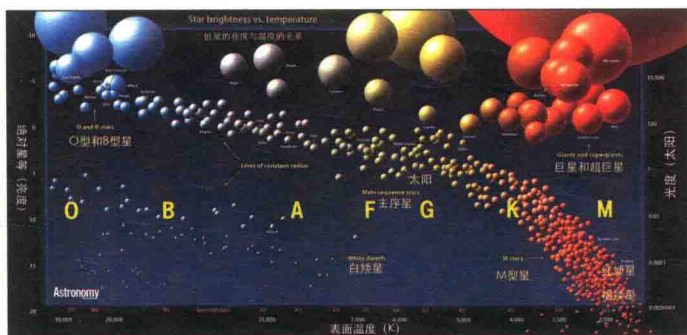


图4 赫罗图

赫罗图可显示恒星的演化过程，大约90%的恒星位于赫罗图左上角至右下角的带状上，这条线称为主序带，主序带上不同位置的恒星的演化路径迥异，而它们的初始质量也各不相同。孤立恒星演化的过程和结局取决于其初始质量（图5）。粗略地说，小于0.08倍太阳质量的星体内部达不到氢聚变的点火温度，这类星体称为褐矮星。大于0.08倍太阳质量而小于8倍太阳质量的恒星在经历某个轻元素聚变的阶段后，由于剩下的核芯区的质量不足以通过引力坍缩升高恒星内部温度，进而导致下一级聚变反应不能点火，恒星将随着核聚变的结束而走向死亡，形成各类白矮星。大于8倍太阳质量的大质量恒星，在经历氢、氦、碳、氦、氧和硅的聚变后，恒星呈现出“洋葱头”式的分层结构，由内至外依次为铁核芯、未燃尽的硅、镁、氦、氧、碳、氦和氢。由于比铁重的元素的聚变反应需要向外界吸收能量才能发生，因而铁核芯区无法继续通过核聚变获得能量来抗拒恒星自身的引力坍缩，最终导致II型超新星爆发，被冲击波抛向星际空间的大量外层物质变为气体和尘埃，进而凝聚成新的恒星。占初始质量一小部分的残余物质形成中子星或黑洞。超新星爆发是宇宙中天体演化的重要环节，它既是老年恒星的辉煌葬礼，同时又是新生恒星的孕育者。例如，1987年2月23日发现的SN 1987A超新星（图6）是天文学上最重大的事件之一，它距离地球16.3万光年，在几个月时间内，这颗超新星一直光彩夺目，亮度相当于1亿颗太阳。