

中国科协三峡科技出版资助计划

宇宙天梯14步

[西班牙] 罗萨·罗斯 [美国] 玫琳凯·海明威 主编

北京天文馆 编译



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

中国科协三峡科技出版资助计划

宇宙天梯 14 步

[西班牙] 罗萨·罗斯 [美国] 玫琳凯·海明威◎主编
北京天文馆◎编译

中国科学技术出版社
· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

宇宙天梯 14 步 / (西班牙) 罗斯, (美国) 海明威主编; 北京天文馆编译.
—北京: 中国科学技术出版社, 2015.1

(中国科协三峡科技出版资助计划)

ISBN 978-7-5046-6758-8

I. ① 宇… II. ① 罗… ② 海… ③ 北… III. ① 宇宙—
普及读物 IV. ① P159-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 283154 号

Original Title: 14 Steps to the Universe

Copyright©NASE 2012-07-10

Copyright©Text by Francis Berthomieu, Alexandre da Costa, Susana Deustua, Julieta Fierro, Beatriz García, Mary Kay Hemenway, Ricardo Moreno, Jay M. Pasachoff, John Percy, Rosa M. Ros, Magda Stavinschi, 2012

著作权合同登记号: 01-2014-6521

版权所有 侵权必究

总 策 划 沈爱民 林初学 刘兴平 孙志禹

责任编辑 赵 晖 郭秋霞

项目策划 杨书宣 赵崇海

责任校对 孟华英

出 版 人 苏 青

印刷监制 李春利

编辑组组长 吕建华 赵 晖

责任印制 张建衣

出 版 中国科学技术出版社

发 行 科学普及出版社发行部

地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号

邮 编 100081

发行电话 010-62103349

传 真 010-62103166

网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm × 1092mm 1/16

字 数 290 千字

印 张 14.5

版 次 2015 年 2 月第 1 版

印 次 2015 年 2 月第 1 次印刷

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司

书 号 ISBN 978-7-5046-6758-8/P · 179

定 价 68.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

总 序

科技是人类智慧的伟大结晶，创新是文明进步的不竭动力。当今世界，科技日益深入影响经济社会发展和人们日常生活，科技创新发展水平深刻反映着一个国家的综合国力和核心竞争力。面对新形势、新要求，我们必须牢牢把握新的科技革命和产业变革机遇，大力实施科教兴国战略和人才强国战略，全面提高自主创新能力。

科技著作是科研成果和自主创新能力的重要体现形式。纵观世界科技发展历史，高水平学术论著的出版常常成为科技进步和科技创新的重要里程碑。1543年，哥白尼的《天体运行论》在他逝世前夕出版，标志着人类在宇宙认识论上的一次革命，新的科学思想得以传遍欧洲，科学革命的序幕由此拉开。1687年，牛顿的代表作《自然哲学的数学原理》问世，在物理学、数学、天文学和哲学等领域产生巨大影响，标志着牛顿力学三大定律和万有引力定律的诞生。1789年，拉瓦锡出版了他的划时代名著《化学纲要》，为使化学确立为一门真正独立的学科奠定了基础，标志着化学新纪元的开端。1873年，麦克斯韦出版的《论电和磁》标志着电磁场理论的创立，该理论将电学、磁学、光学统一起来，成为19世纪物理学发展的最光辉成果。

这些伟大的学术论著凝聚着科学巨匠们的伟大科学思想，标志着不同时代科学技术的革命性进展，成为支撑相应学科发展宽厚、坚实的奠基石。放眼全球，科技论著的出版数量和质量，集中体现了各国科技工作者的原始创新能力，一个国家但凡拥有强大的自主创新能力，无一例外也反映到其出版的科技论著数量、质量和影响力上。出版高水平、高质量的学术著

作，成为科技工作者的奋斗目标和出版工作者的不懈追求。

中国科学技术协会是中国科技工作者的群众组织，是党和政府联系科技工作者的桥梁和纽带，在组织开展学术交流、科学普及、人才举荐、决策咨询等方面，具有独特的学科智力优势和组织网络优势。中国长江三峡集团公司是中国特大型国有独资企业，是推动我国经济发展、社会进步、民生改善、科技创新和国家安全的重要力量。2011年12月，中国科学技术协会和中国长江三峡集团公司签订战略合作协议，联合设立“中国科协三峡科技出版资助计划”，资助全国从事基础研究、应用基础研究或技术开发、改造和产品研发的科技工作者出版高水平的科技学术著作，并向45岁以下青年科技工作者、中国青年科技奖获得者和全国百篇优秀博士论文获得者倾斜，重点资助科技人员出版首部学术专著。

由衷地希望，“中国科协三峡科技出版资助计划”的实施，对更好地聚集原创科研成果，推动国家科技创新和学科发展，促进科技工作者学术成长，繁荣科技出版，打造中国科学技术出版社学术出版品牌，产生积极的、重要的作用。

是为序。

前言

“天坠未形，冯冯翼翼，洞洞濈濈，故曰太昭。道始于虚霁，虚霁生宇宙，宇宙生气。气有涯垠，清阳者薄靡而为天，重浊者凝滞而为地。清妙之合专易，重浊之凝竭难，故天先成而地后定”，这是《淮南子》卷三天文中有关天地、宇宙形成的描述。两千多年后的我们，面对着低空轨道上的哈勃空间望远镜、月球上的“玉兔”以及火星上的漫游者传回的铺天盖地的壮美星空图像，听着新闻中不断传来的新鲜概念，从“宇宙在加速膨胀”到“上帝粒子”，当然早已知晓《淮南子》的宇宙观是浪漫但不符合实际的。遑论两千多年前的西汉，即使近在400多年前，在伽利略把望远镜指向夜空前，人类都不相信月球并非完美，居然遍布陨坑；100年前，在埃德温·哈勃发现星系退行和宇宙膨胀前，人类甚至认为银河系就是宇宙的全部；8年前，太阳系还拥有9颗行星；5年前，在帕姆特利用超新星重塑宇宙膨胀历史前，人类也不相信我们所在的宇宙会加速永远膨胀下去……这就是天文学，一门最古老也最日新月异的自然科学，充满神秘，充满挑战。任何一个文明都有一脉相承的天文学传统；任何一个民族都有自己独特的宇宙观。

作为四大文明古国之一，中国拥有古老而完整的天文观测记录，在天文学发展的历史上做出过卓越的贡献。与我们灿烂辉煌的古天文成就相得益彰的，是今天活跃在国际天文学研究前沿的各位中国天文学家。然而，令人惋惜的是，作为六大基础学科（数理化天地生）之一的天文学，并不是九年义务教育的必修内容，我国的中小学天文基础教育现状着实令人担忧。一方面，天文学对于培养学生的科学素养、建立正确的世界观、人生观有着无可取代的重要作用，孩子们对天文学的兴趣也日益浓厚；另一方面，有意从事天文基础教育的中小学校，既苦于没有专门的天文教师，又苦于没有合适且系统的天文学教材。

2012年，IAU（国际天文学联合会）首次在中国举办大会，北京天文馆负责承办IAU大会教育分会场的活动。IAU第46委员会（即教育委员会）的Rosa M. Ros教授（西

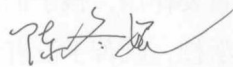
班牙巴塞罗那加泰罗尼亚理工大学)和 Beatriz García 教授(阿根廷国立技术大学)与北京天文馆共同举办了为期一天的天文教师培训活动。因时间紧迫,活动只包括 NASE (Network for Astronomy School Education)项目中的一小部分内容,但由于设计理念新颖,动手实践与理论讲学搭配合理,得到参加培训的各位地理、物理教师极其热烈的反应,强烈要求北京天文馆常年举办此类培训活动。2013 年 8 月,北京天文馆邀请 Rosa M. Ros 和 Beatriz García 第二次来到北京,举办了为期一周的天文教师培训活动。北京天文馆派出张子平、李昕、戴岩、冯翀、苗军等多位天文专业的工作人员,与两位 NASE 专家一起,以中英双语将 NASE 全部 4 个讲座模块和 10 个动手实践模块的内容完完整整地呈现给参加培训的各位老师。

NASE 项目内容的英文版已经汇集成书 *14 Steps to the Universe* 在欧洲出版。看到中国教师对本项目如此欢迎,北京天文馆决定将全书翻译为中文,作为天文教师培训参考资料提供给全国有志从事天文基础教育的老师。感谢 *14 Steps to the Universe* 的多位作者,感谢 Antares 出版社,免费把中文版权转让给中国科学技术出版社。感谢中国科学技术出版社的赵晖女士,一力促成本书的印刷出版。感谢欧阳自远院士对本书的充分肯定和热情帮助。感谢中科院国家天文台的邹振隆教授对本书出版给予的大力支持和宝贵意见。本书由中国科协三峡科技出版资助计划资助出版。

结合两次在北京举办的天文教师培训活动,中文版《宇宙天梯 14 步》修改了英文版中的错误,增加了参训教师的课堂活动照片。随书附录的制作材料可供实际教学活动使用。本书既可以用作中小学天文教师培训教材,也可供天文爱好者开展活动之用。10 个动手操作单元彼此独立,没有顺序关系,读者可以从任何一个单元起步。4 个讲座模块与动手操作单元之间有关联,具体内容参见书中详情。原书的数据资料更新至 2009 年,请读者自行查阅最新的数据。

北京天文馆的戴岩、冯翀、苗军 3 位年轻的“80 后”负责编译全文。他们分别毕业于北京师范大学天文系、中国科学院国家天文台和南京大学天文系,拥有扎实的天文专业背景和优秀的中英文书面表达能力,具体分工为:戴岩负责讲座 3 及文中活动 5、7、8、9、10 的翻译工作,冯翀负责讲座 1、2、4 及文中活动 6 的翻译工作,苗军负责文中活动 1、2、3、4 的翻译工作。作为项目负责人,我审校了全文。

再次感谢对本书出版做出重要贡献的各位同仁!



2014 年 2 月 28 日于北京天文馆

目 录

总 序

前 言

第一部分 理论基础

- 第 1 章 恒星的演化 约翰·珀西 003
- 第 2 章 宇宙学 朱丽叶·菲耶罗 比阿特丽斯·加西亚 017
- 第 3 章 天文学史 杰伊·巴萨乔夫 玛格达·斯蒂文斯基 玫琳凯·海明威 025
- 第 4 章 太阳系 玛格达·斯蒂文斯基 040

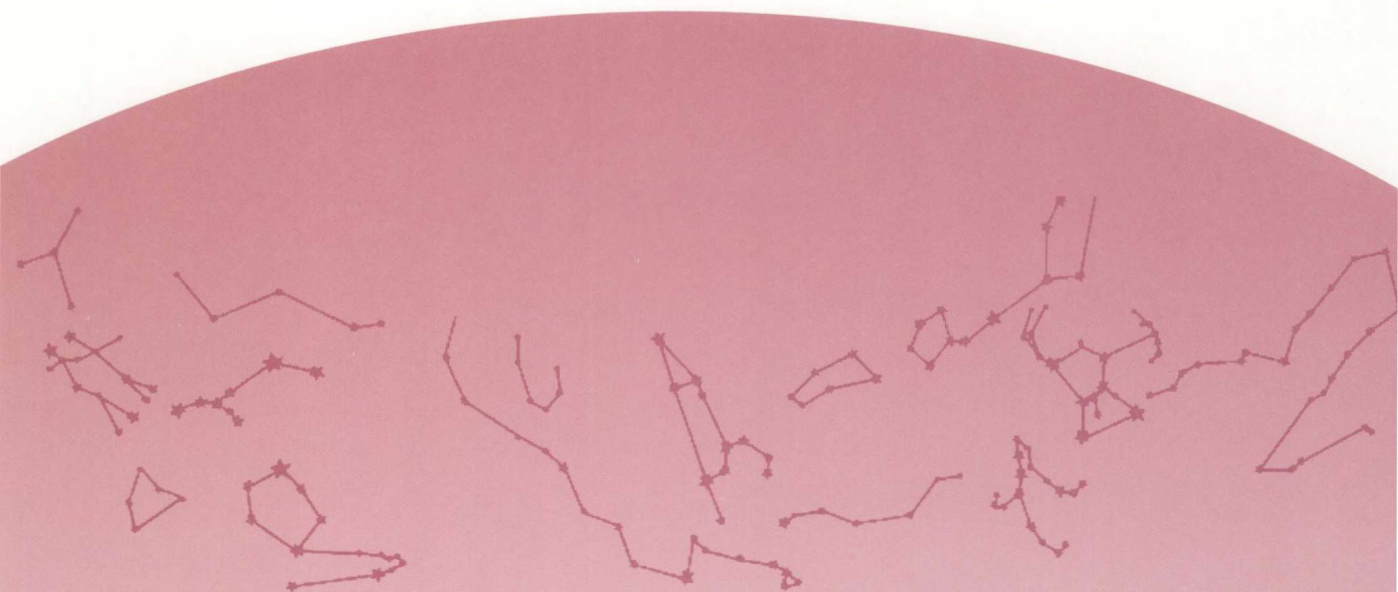
第二部分 科学实践

- 第 1 章 本地地平圈与日晷 罗萨·罗斯 067
- 第 2 章 恒星、太阳、月亮的视运动演示模型 罗萨·罗斯 081
- 第 3 章 日—地—月系统：相与食 罗萨·罗斯 100
- 第 4 章 小天文学家的手提箱 罗萨·罗斯 112
- 第 5 章 太阳光谱与黑子 亚历山大·科斯塔 比阿特丽斯·加西亚
里卡多·莫雷诺 124

第 6 章	恒星的一生	亚历山大·科斯塔 比阿特丽斯·加西亚 里卡多·莫雷诺 罗萨·罗斯	138
第 7 章	可见光外的天文学	比阿特丽斯·加西亚 里卡多·莫雷诺 罗萨·罗斯	154
第 8 章	宇宙的膨胀	里卡多·莫雷诺 苏珊娜·德乌斯图亚	168
第 9 章	行星与系外行星	罗萨·罗斯	181
第 10 章	观测准备	弗朗西斯·博斯米修 里卡多·莫雷诺 比阿特丽斯·加西亚 罗萨·罗斯	199
	参考资料		210
	索引		217

第一部分

理论基础



第 1 章

恒星的演化

约翰·珀西

国际天文学联合会，多伦多大学（加拿大）

摘要

在本章中，将介绍一些关于恒星及恒星演化的相关知识。这部分内容对中学物理学科的老师是非常有用的。另外，参考资料中还附了部分科学课程典型教学案例的链接，以及一些适合学生开展的相关活动。

目标

- 了解恒星演化过程。
- 了解赫罗图。
- 了解绝对星等和视星等的系统知识。

引言

恒星的演化主要是研究从恒星诞生之初到它最后死去的那一刻，在这漫长一生中发生的变化过程。引力不断迫使恒星辐射出能量，恒星的内部则通过较轻元素转化成较重元素的核聚变过程来产生能量，从而填补不断输出能量的缺失。这一过程会缓慢地改变恒星的化学组成，进而导致其他性质的变化。最终，它将耗尽有限的核燃料，走向死亡。太阳的存在让地球出现生命成为了可能，我们只有了解了恒星的各项性质和演化过程，才有可能对我们自己的恒星——太阳的性质和演化有所了解并满怀感恩之情。对恒星演化的研究将帮助我们厘清太阳系的起源，了解构成万物的分子、原子，甚至生命的起源；并且还将为我们解答这类重要的问题——“是否还有其他恒星也能够产生足够的能量、维持足够长时间的稳定状态，使得它周围的行星上有可能产生并进化出生命”。总而言之，对于学生来说，恒星的演化是个非常有趣的课题。

太阳和其他恒星的性质

要想了解太阳及其他恒星的起源和演化，首先要了解它们的各项特性。学生还需要知晓这些特性参数是如何确定的。太阳作为离我们最近的恒星，将在这个系列讲座中另作单独介绍。在本篇中，我们将从恒星演化的角度来了解太阳。学生需要掌握太阳的性质、组成结构和能量来源，因为天文学家基于同样的原理来确定其他恒星的结构与演化。

太阳

相较于其他遥远的恒星，太阳的基本参数比较容易测得。日地平均距离为 $1.495978715 \times 10^{11}$ 米（我们常称为“1au”，即一个天文单位）；在此距离上，观测到的太阳角半径为 959.63 角秒，利用几何关系转化成线半径为 6.96265×10^8 米或 696265 千米。在地球上观测到的辐射流量为 1370 瓦 / 平方米，由此计算可得太阳的辐射总功率为 3.85×10^{26} 瓦。

根据太阳对其他行星的引力作用，利用牛顿运动定律和万有引力可计算出太阳的质量，约为 1.9891×10^{30} 千克。太阳光球层的表面温度大约为 5780 开尔文（简称为“开”）。太阳的自转周期是 25 天左右，不同纬度的自转速度不同，但基本上还是保持球形。太阳主要由氢和氦构成。在第二部分第 2 章中，学生将可以实际观测太阳这个最近的恒星，从而了解恒星的真实面貌。

恒星

恒星的视亮度是最直接的可观测性质。它以星等为计量单位，是我们所接收到的能量通量的对数。

这种星等标准是由希腊天文学家依巴谷（公元前 190—公元前 120 年）发明的。他将恒星根据星等分成 1~5 等，越暗的恒星系数值越大。后来，人们发现由于人体感官对于刺激的反应存在一个对数关系，所以对应相邻两个星等的亮度变化实际上存在对应的固定比率（2.512 倍）。夜空中最亮的恒星为 -1.44 等。使用最大口径的望远镜，我们能观测到的最暗恒星大概是 30 等。恒星的视亮度 B ，取决于它本身的辐射功率 P 以及距离 D 。根据亮度的平方反比定律，亮度与辐射功率呈正比，与距离的平方呈反比，即 $B \approx P/D^2$ 。我们可以利用三角视差法来测定较近恒星的距离。在第二部分第 6 章中，学生可以通过演示实验来理解三角视差法，并且发现三角视差法中距离的平方与亮度成反比的关系。继而，通过测得的恒星视亮度和亮度的平方反比定律，就可知恒星的辐射功率。

不同的恒星颜色也略有不同，最直观的方法就是看看猎户座（图 1-1-1）中的参宿七（猎户座 β ）和参宿四（猎户座 α ）。在第二部分第 10 章中，将安排学生夜晚观星，让他们感受真实星空的奇妙和美好。恒星颜色的不同是由于恒星辐射层温度的不同造成的——较冷的恒星颜色偏红，较热的恒星颜色偏蓝（这和我们在浴室水龙头上标注的红热蓝冷是相反的）。由于人眼对颜色的响应机制，我们肉眼看红色的恒星显现为红白色，蓝色的恒星显现为蓝白色。通过配备了彩色滤片的光度计，我们可以精确测量出恒星的温度，进而也可根据颜色计算出温度。

通过恒星的光谱信息，我们也能得知恒星的温度。具体来说，光谱信息就是指在恒星的辐射中体现出的不同颜色或波长的分布情况（图 1-1-2）。图 1-1-2 为我们展示了来自恒星辐射光中的美丽色彩。这些辐射最先通过了恒星本身的外层大气，在此过程中，大气中的离子、原子、分子将会吸收掉光谱中的某些谱线，这会使光谱中出现暗线或者颜色的缺失（图 1-1-2）。由于外层大气的具体温度不同，这些原子可能会被电离、被激发，或者结合成为其他分子。因此，通过光谱我们可以了解相应的原子信息，进而帮助我们确定温度。

在一个世纪之前，天文学家发现了恒星辐射功率与温度之间的一个重要对应关系：对于大多数恒星来说（并非全部），其辐射功率越大，温度也越高。接着，天文学家又发现其实恒星的质量才是关键的因素：质量越大的恒星，其辐射功率也越大，也相应越热。图 1-1-3 就是一幅展示了恒星辐射功率与温度关系的图表，称为赫罗图。在第二部分第 6 章中，这是非常重要的一幅图，学生不仅要了解它的组成，还要能解释其中的含义。



图 1-1-1 猎户座。图中左上角的是参宿四，它温度较低，所以微微发红。右下角的是参宿七，它温度较高，所以呈现蓝色的光辉。猎户座大星云就在猎户星座中间腰带三星的下方

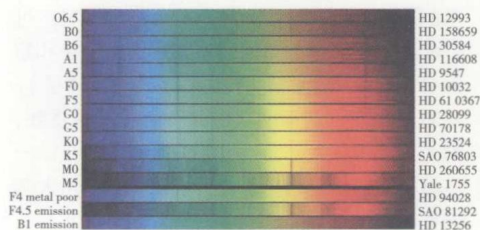


图 1-1-2 图中展示了多颗恒星的光谱，从上至下，温度依次降低，最热的是顶端的 O6.5，最冷的是倒数第四的 M5。正是由于各个恒星的温度不同，所以产生了外观也各不相同的光谱。最后三个是比较特殊的三颗恒星。来源：NOAO

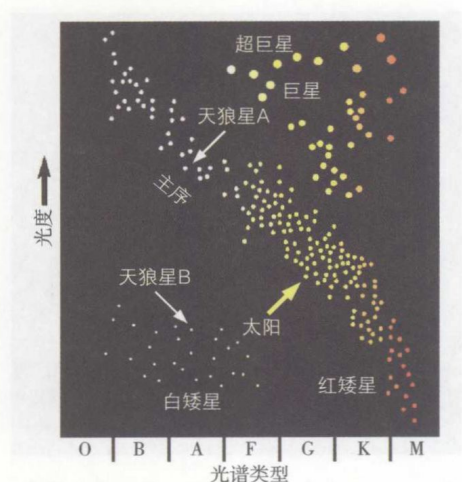


图 1-1-3 赫罗图。这是表示恒星的辐射功率（或者光度）与其温度关系的图表。由于历史定义的原因，该图表中的温度是从右向左升高的。字母 O、B、A、F、G、K、M 分别代表了不同的光谱类型，也和不同的温度相对应。图中的彩点分别表征了各种半径大小的恒星；可以看出，右上角分布的恒星都较大（巨星和超巨星），左下角分布的恒星相对较小（矮星）。从右下到左上这条明显的分布路径非常重要，称为主序带。大部分恒星都分布在此带上。一些著名的恒星也已标明位置。来源：加州大学伯克利分校

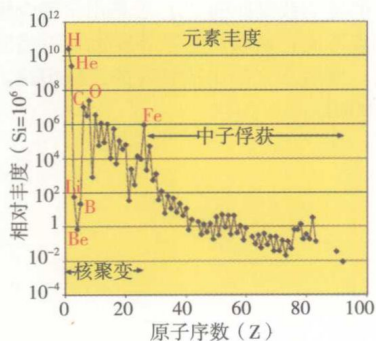


图 1-1-4 太阳和恒星中的化学元素丰度。其中氢和氦最为丰富，锂、铍、硼含量很少，碳、氮、氧含量较多。随着元素原子序数的增加，含量也急剧下降。氢元素的含量要比铀高 10^{12} 倍。具有偶数个质子的元素要比奇数个质子的元素丰度高。比铁元素轻的元素都产生于恒星中的核聚变，而比铁元素重的元素都产生于超新星爆发中的中子俘获过程。来源：NASA

确定不同类型恒星的辐射功率是天文学的一个主要目标。如果完成了这一工作，那么今后在宇宙的其他地方发现了这类恒星，天文学家就能利用测得的视亮度和对应的估计温度，根据亮度的平方反比定律 $B \approx P/D^2$ 求解出距离 D 。

恒星（或者星云）的光谱还能揭示其化学组成。图 1-1-4 为宇宙化学元素丰度曲线，可见其中约 3/4 为氢，1/4 为氦，2% 为较重元素，主要是碳、氮和氧。

在太阳的恒星邻居中，有大约一半都是双星，围着彼此在轨道上绕转。在天文学上，双星非常重要，因为天文学家可以据此计算恒星的质量——通过观察一颗恒星的运动，就可以计算出另一颗恒星的质量；反之亦然。天狼星、南河三和五车二就是典型的双星。除了双星，还有聚星的情况，也就是三颗或者三颗以上的恒星围绕着互相绕转。距离太阳最近的恒星——半人马座 α 星就是一个三合星。天琴座的织女二是一个四合星系统。

上文曾经提到，恒星的辐射功率和质量存在非常重要的关系：即其辐射功率与质量的三次方呈正比，我们也称为质光关系。

恒星的质量范围大约是 0.1~100 倍的太阳质量，对应的辐射功率范围大约是 0.0001~1000000 倍的太阳辐射功率。作为普通的恒星来说，一般最热为 50000 开，最冷为 2000 开。天文学家通过巡天发现，太阳比周围 95% 的恒星的质量大，辐射功率也更高。其实，宇宙中大质量、高辐射功率的恒星是很少的。而我们的太阳也绝非普通尺寸的恒星，它已经超过了平均值！

太阳和恒星的结构

太阳和恒星的结构主要取决于引力的作用。正是引力的作用才让流体的太阳保持着几乎完美的球形。

越深入太阳的内部，压力就越大，这是由于外圈气体层的质量造成的。根据气体定律可知，对于理想气体来说，压力越大，密度和温度也会越高。由于热量会从高温处传向低温处，所以内部相对高温的气体层会将热量传导到外层温度较低处。这种热量的传输会以热辐射或者热对流的形式完成。以上三种原因共同决定质光关系。

按照上文的推理，如果热量由太阳内部传出，则太阳内层会因此变冷，进而由于引力作用太阳也会发生收缩——但是，如果太阳内部正在源源不断地产生能量呢？原来太阳并没有因此收缩是由于其内部正在发生着热核聚变过程，由此产生的辐射压阻止了太阳的收缩。

以上四大原理适用于所有的恒星，它们的关系可以通过方程式表示，并利用计算机给出结果。因此，天文学家们也给出了适用于太阳或者是其他恒星的基本模型，从而给定了恒星各个半径位置上的压力、密度、温度和能量传输。这也正是天文学家们研究恒星结构及其演化的基本方法。构建一个恒星模型只需要确定恒星的质量和化学组成，据此天文学家们就能估计出恒星的半径、辐射功率和其他可观测性质（图 1-1-5）。

目前，天文学家已经探索出了一种非常有效的方法来检验太阳以及其他恒星的结构模型——日震学（对于其他恒星则称为星震学）。太阳和其他恒星都在以成千上万种不同的模式轻微地震动着，这些震动是可以通过灵敏的观测仪器探测到的，通过比较各种不同震动模式的特征，我们就能确定其所属的具体模型类别。

太阳和恒星的能量来源

在很久以前，科学家们就一直想知道太阳和恒

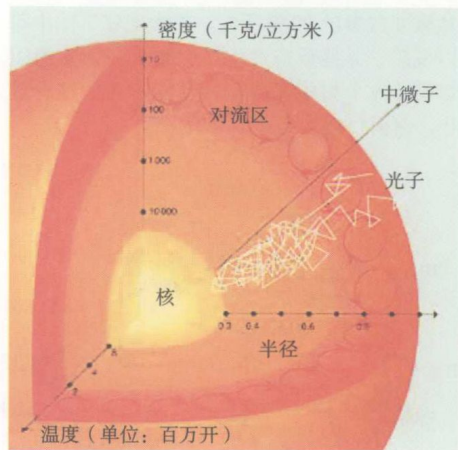


图 1-1-5 根据物理模型给出的太阳截面示意图。在外层的对流区，能量通过对流的方式传导；在内层，则以辐射的方式完成热传导。而太阳的核心则在不断产生能量。来源：奥斯陆大学理论物理研究所

星的能量来源。石油或天然气这类化学燃料的燃烧是最容易想到的答案，但是太阳却以这样高的辐射功率（ 4×10^{26} 瓦）至少持续燃烧了几千年。直到前几个世纪，人们还都相信着《圣经》中提到的——地球和宇宙的年龄仅仅几千年而已。

好在艾萨克·牛顿发现了宇宙中的万有引力定律，这才让科学家们意识到太阳和众多恒星很可能是通过缓慢地收缩在产生能量。引力（势）能有可能被转换成了热量和辐射。这种能量来源足以维持数千万年。不过，地质学的证据却暗示地球以及太阳的年龄可能要远远超过这一数值。

在 19 世纪后期，科学家发现了放射性和核裂变。但是因为太阳和其他恒星上的放射性元素较为稀少，仅靠这些元素也难以支持数十亿年。

直到 20 世纪，科学家们终于发现较轻的元素可以聚变成较重元素，并称为核聚变。只要温度和密度足够高，就能产生非常巨大的能量——足以维持太阳和其他恒星的不断燃烧。氢元素是最具潜力的聚变能源，而它也是太阳和恒星上最为丰富的元素。

我们把发生在太阳这类小质量恒星上的一系列氢聚变反应称为 PP 链，在此过程中两个质子聚变成氘，另一个质子与氘聚变成氦-3，氦-3 核聚变产生最常见的氦同位素——氦-4（图 1-1-6）。

在大质量恒星上，氢聚变成氦的过程是不同的，我们将这一系列聚变称为 CNO 循环，在此过程中，碳-12 充当了催化剂的角色（图 1-1-7）。在以上两种情况下，最后都是四个氢原子核融合成了一个氦原子核，而氢原子核的一小部分质量转化为能量。由于原子核带正电，所以互相排斥，因此只有当原子核受到高速（高温）、高频（高密度）地撞击才有可能发生核聚变反应。

如果核聚变是太阳的能量来源，那么在此反应

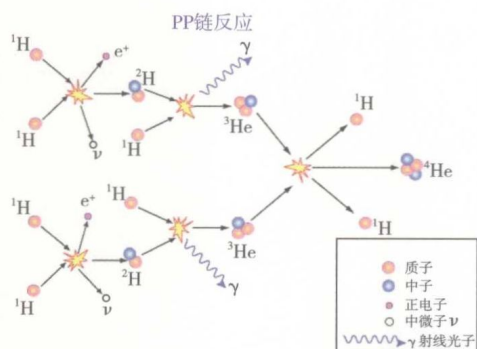


图 1-1-6 在太阳和其他小质量恒星中发生氢聚变成氦的 PP 链反应。在本图和下图中可以发现，某些反应产生了中微子 ν 。能量以伽马 (γ) 射线和原子核动能的方式被释放出。来源：澳大利亚国立天文台

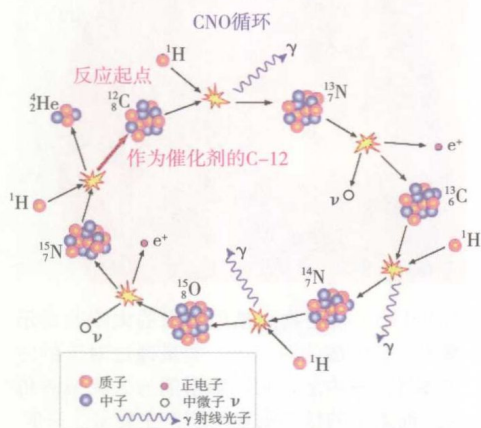


图 1-1-7 在大质量恒星中发生氢聚变成氦的 CNO 循环反应。其中碳-12（标志着反应的开始）是催化剂，它并没有发生聚变但却参与了整个反应过程。来源：澳大利亚国立天文台