

牛顿

Newton
Science Museum

科学馆

恒星的故事

WHAT ARE THE STARS

(印) 加尼森·斯里尼瓦桑 (Ganesan Srinivasan) ◎ 著

李庆康◎译



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

牛顿

Newton
Science Museum

科学馆

恒星的故事

WHAT ARE THE STARS

(印) 加尼森·斯里尼瓦桑 (Ganesan Srinivasan) ◎ 著

李庆康◎译



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

版权声明

What are the Stars?

Copyright © University Press (India) Private Limited 2011. This translation of What are the Stars?, G Srinivasan first published in 2011, is published by arrangement with Universities Press (India) Private Limited.

北京市版权局著作权合同登记图字 01—2015—1001 号

本书中文简体翻译版授权由北京师范大学出版社独家出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

图书在版编目(CIP)数据

恒星的故事/(印)加尼森·斯里尼瓦桑著;李庆康译. —北京:北京师范大学出版社, 2018. 8
(牛顿科学馆)
ISBN 978-7-303-22647-4

I. ①恒… II. ①加… ②李… III. ①恒星—普及读物
IV. ①P152-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 179564 号

营 销 中 心 电 话 010-58805072 58807651
北师大出版社高等教育与学术著作分社 <http://xueda.bnup.com>

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com
北京市海淀区新街口外大街 19 号
邮政编码: 100875

印 刷: 天津中印联印务有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 890 mm×1240 mm 1/32
印 张: 8.875
字 数: 204 千字
版 次: 2018 年 8 月第 1 版
印 次: 2018 年 8 月第 1 次印刷
定 价: 38.00 元

策划编辑: 尹卫霞	责任编辑: 马力敏 张静洁
美术编辑: 李向昕	装帧设计: 李向昕
责任校对: 韩兆涛	责任印制: 马 洁

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

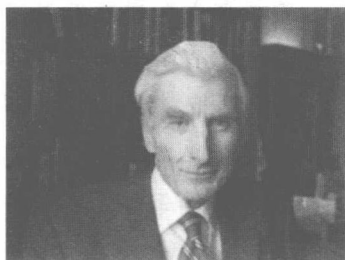
北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58805079

序 言



马丁·里斯 勋爵
宇宙学和天体物理学教授
英国皇家天文学家
剑桥大学三一学院院长
英国皇家学会前任会长

如果随机选择 1 万个人，其中的 9 999 人应该有一些共同 1
点——他们的工作和他们的兴趣爱好都是在地球表面或接近地球
表面，剩下的那个就是天文学家。我很幸运自己是这个奇怪的群
体中的一员——斯里尼瓦桑博士也是其中之一，他是题名为“当
今天文学革命”这个系列著作的作者。但是天文学不只为天文学家
专属。它的发现是迷人的，而且了解宇宙与理解自然界的其余部分
同等重要。整个宇宙是我们环境的一部分。事实上，暗夜的星空
在整个人类历史上是基本不变的，它被所有的文化共享——尽管
阐释它的方式非常不同。

天文学家是人类悠久传统的继承人。也许除了医学，天文学是最古老的科学。它的产生是因为需要建立日历来度量时间，解释在天空中看到的情景和规律。现在，我们的知识比以往任何时候都进步得更快，这要感谢功能强大的望远镜以及飞往其他行星的探测器。公众已经从这些探索中分享了激动人心的成就。

我们还不能把实际的探测器发送到太阳系以外，但是通过使用望远镜，我们可以详细地研究恒星。在过去的十年中，我们学到了一些东西，它使得夜空更加有趣。恒星不只是闪烁的“光点”，它们就像太阳一样，有行星这样的随从绕行着。其中的一些行星可能会像地球，但它们中的任何一个上是否存在生命，依然是个问题，而且这个问题会给未来几代科学家带来挑战。

我们已经意识到宇宙在空间和时间上的巨大尺度。我们生活在一个有超过一千亿颗恒星的星系中，但是这个星系只不过是现代望远镜可见的一千亿个星系中的一个。因为来自遥远天体的光要经历很长一段时间才能到达我们这里，所以在宇宙空间中极目远眺，实际上就是在时间上往宇宙早期追溯。天文学家比地理学家和化石搜寻者有一个优势：他们实际上可以观测到过去，追溯到第一代恒星和星系形成的宇宙历史。确实有令人信服的证据表明，我们的宇宙创生于大约 140 亿年前的一次“大爆炸”，之后就一直在膨胀。

我们已经知道关于宇宙的一件关键的事：它是由我们可以理解的物理规律所支配的，而这些规律似乎处处普适。通过分析来自遥远星系的光，我们可以推断出组成遥远星系的原子的行为就像我们在实验室里所研究的原子那样。正是因为这样的一致性，我们才能够了解恒星的结构及其生死循环，以及恒星、星系和行

星如何从简单开始，形成我们身在其中、有复杂结构的宇宙。

宇宙是一个统一体。很小的原子级别的微观世界和非常大的恒星、星系级别的宏观世界之间存在联系。恒星形成、演化，最后死亡(有时是爆炸性的)。它们通过核聚变提供能量，这种核聚变和氢弹爆炸一样，但是它是受控的。在恒星的一生中，从原始的氢到碳、氧和铁，这个过程会不断发生。地球上所有的原子，包括我们身体里的原子，都是恒星死亡后的灰烬。我们是使恒星发光的核聚变的“核废料”。要充分了解我们自己和我们的起源，我们不仅要了解达尔文的进化论，而且要了解组成所有生命物质的原子，还要了解产生这些原子的恒星。这个精彩的故事应该是每个人学习生涯中的一个组成部分。

研究天文学还有另一个原因。它使我们能够探索在地球上的实验室里无法触及的，在更极端的温度、压力和能量条件下的自然规律。它还允许我们研究引力这个最基本的力，以及它如何把空间和时间的本质关联到一起。

无疑，现在是天文学的黄金时代。随着太空时代的到来，通向宇宙的新窗口已经被打开。通过在地球大气层之上威力巨大的在轨天文台，天文学家现在可以在很宽的波长范围内探索宇宙，包括：射电波、毫米波、红外辐射、可见光辐射、紫外线、X射线和 γ 射线。这使得天文学家能够对各种有关的问题取得前所未有的进展，包括：恒星的本质及其演化史，恒星的诞生和死亡，恒星的坟墓——白矮星、中子星和黑洞，星系，类星体，宇宙大尺度结构。

“当今天文学革命”系列著作是非常及时的，它的目的是从入门级的难度水平审视当代天文学的成就。该系列图书的作者斯里

尼瓦桑博士是这个行当中国际知名的领军人物。特别是，他一直研究中子星，而中子星本身就体现了惊人的“极端”物理。读者会发现，在这些精彩的和可读性很强的图书中，斯里尼瓦桑博士是一位清楚地、热情地指导大家探索宇宙的奇景和奥秘的向导。我们大家都应该感谢他。

马丁·里斯

于剑桥

前 言

2009 年被誉为国际天文年，这是为了纪念伽利略 400 年前首先用望远镜观测天体。400 年来，天文观测彻底改变了人类对天体的认识。

4 个世纪后，我们又处在天文学的另一个黄金时代。太空时代的到来为我们研究宇宙打开了新的窗口，由此产生了许多惊人的发现，并在认识天体的本质方面取得了前所未有的进展。与此同时，许多新的和突出的问题也出现了。事实上，有明显的迹象表明，一些难题的解决可能需要基础物理学本身的重大修改。微观和宏观的内在联系正在变得越来越清晰。

“当今天文学革命”系列著作打算让读者了解当代天文学取得的激动人心的成就。撰写这些著作的灵感源自参加我所讲授的跨校际课程的同学们的热情建议。我曾经在印度班加罗尔的圣约瑟夫学院讲授这门课程 5 年。这门课程不是常规的学术课程，而是为这个城市里所有大学中对天文学和天体物理学感兴趣的老师和同学们开设的。有趣的是，每一批学生中半数以上是来自工科，而不是纯理科。不过呢，他们为天文学的魅力着迷。虽然本课程深层的主题是“当今天文学革命”，但是我的想法是把天文学当成一匹特洛伊木马，从而让学生直面物理和天文、工程和技术世界中那些令人兴奋的挑战。同学们一致要求我把这些年的讲座提炼成系列丛书。

为什么我认为值得写这些书，还有第二个原因。历史上，天文学一直对公众有很大的吸引力，今天更是如此。新望远镜接二连三地投入使用，获得的新发现得到了传统媒体和电子媒体的广泛宣传。一些太空机构，如美国国家航空航天局以及一些优秀的天文台，有令人印象深刻的公众服务计划。然而，在印度几乎没有一所大学把天文学当作本科课程之一提供给学生。直接后果就是：尽管在印度有几个真正的世界级水平的观测设备，但学生们普遍对天文学缺乏了解，所以很少有学生选择从事天文学。本系列丛书旨在力所能及地填补这一空白。

现在谈谈这些著作的范畴和写作风格。我的主要目的是向年轻的和不那么年轻的读者介绍当前天文学正在进行的革命。我们将讨论大家广泛关注的主题的最新进展：恒星的本质及其演化史，恒星的诞生和死亡，恒星的坟墓——白矮星、中子星和黑洞，星系，类星体，宇宙大尺度结构。

这些著作不打算扮演天文学“教科书”的角色。如果是教材，那它们必须根据教育学的方法来精炼主题，对实验方法和现象需详细描述并用系统的方法推演出该理论的数学表述结果，另外还需要有一些问题和习题，等等。但是，当所有这些都需要认真学习的时候，传统的教材就会出现严重的缺陷。导论性的书籍是以入门知识作为开始的，很少能够传递激动人心的当代科学进展。它们倾向于关注已解决的问题，而不是强调还没有解决的困惑。与这些相对照，这一系列著作有不同的目的。我希望它们能给读者介绍最近的科研进展并强调那些突出和亟待解决的问题。我相信，年轻的读者将会对尚未解决的难题更感兴趣，并想知道真正的挑战在何处。

这一系列著作与传统的天文学书籍有一个非常不同的风格。例如，它们不讨论天体的距离测量、质量和光度测定等话题，它们也不详述在天空中确定恒星位置的坐标系统以及恒星的光谱分类等。虽然这些是最基本的问题，但是我的观点是如果一个读者决定成为一名职业天文学家，他将在之后的常规课程中学习这些内容。这一系列著作的重点将放在物理上，原因如下。

在艾萨克·牛顿取得的众多伟大发现中，意义最深远的或许是他断言自然规律具有普遍有效性。换句话说，在地球上支配各种自然现象的物理定律在宇宙中任何地方都适用。今天，我们把牛顿的这个论断作为一个公理。确实，在过去的几个世纪里，从实验物理的角度来看，若干开创性的成就都来自天文观测。万有引力定律的发现、原子光谱中的吸收线和发射线、氢元素的发现，以及对狭义相对论和广义相对论预言的首次验证等就是其中一些比较重要的例子。这是毫不奇怪的。天体的密度、温度和压力的变化范围，与人们在地球上所遇到的相比，是令人难以置信的。例如，密度范围从每立方厘米 1 个原子到每立方厘米 10^{37} 个原子，温度范围从 3 K (1 K = -272.15°C) 到 10^8 K，如此极端的条件确实让我们很难理解。因此，在天体上会遇到许多新奇和怪异的物理现象。事实上，几十年前人们可能会说“天文学是物理学的终点”。不过，今天说“物理学是天文学的终点”应该会更恰当些。通过阅读这一系列著作，我们将明白这一范式转变的个中缘由。因此，我们将集中研究天体的物理性质方面，如它们的本质、它们的稳定性、它们中心的能源、它们的辐射机制，等等。

在阐述这一系列著作的目的后，我必须再补充一点。要读懂本丛书，我不认为读者需要有任何天文学背景知识。对于物理知

识，比方说具有哈里德和雷斯尼克所著的《物理学基础》中的水平，应该就足够了。在书中我们会连带介绍其他方面的背景知识。为了达到既定目标，我经常需要牺牲严谨的论述，取而代之以简单的类比和定性讨论。读者应该理解我不得不如此行文而不需要任何道歉！如果这些著作能够成功展现现代天文学所取得的激动人心的成就，那么我认为我的努力是值得的。对于年轻的读者，我非常希望这些著作可以唤起他们对天文学的兴趣，以致他们想进一步去阅读学术性更强的书籍来探求更深的专题。

当我还年轻的时候，我很高兴和荣幸能够读到一些绝好的著作，如亚瑟·爱丁顿(Arthur Eddington)爵士^①、詹姆斯·金斯(James Jeans)爵士和乔治·伽莫夫(George Gamow)这些大师的著作。在这些书中，他们阐述了20世纪早期物理学和天文学的发展。最近，一些优秀的物理学家和天体物理学家也按照类似的脉络推出了若干著作。现在是“互联网”时代，本系列著作谨代表我也以同样的勇气做了一点非常卑微的努力。

关于本书

4

这本书从概述当今天文学革命入手。它应该能够让大家感受到本系列著作中我们要讨论的主题。本书的其余部分主要讨论恒星的本质、它们的稳定性和它们所辐射能量的来源。天体物理学就是从这些方面开始的。天体物理学开始于19世纪初的几十年。

① 编辑注：亚瑟·爱丁顿爵士，即亚瑟·斯坦利·爱丁顿爵士，见本书75页。

虽然这个学科在 1870 年就奠基了, 但该学科结构在 20 世纪 20 年代才建成。我们对恒星本质的理解, 大多可以追溯到这一时期。正如前面所提及, 该系列著作不仅要告诉读者天文学中哪些东西已经很好地解决了, 而且要告诉读者当前天体物理学中那些令人兴奋的挑战。有趣的是, 证实 20 世纪二三十年代许多颇具先见之明的猜想的决定性证据是在最近 10 多年才得到的。这本书的最后两章将重点介绍这些最新进展。

致 谢

出版这一系列著作的想法首先是由参加我所讲授的天文学和天体物理学校际课程的同学提出的。ISRO 卫星中心的斯雷库马 (P. Sreekumar) 博士强烈支持这个建议。同学们对另一系列丛书中由文卡塔拉曼 (D. Venkataraman) 博士撰写的《物理学花絮》反应热烈。文卡塔拉曼积极持续地劝说我应该写点关于当代天文学的类似系列丛书, 这让我感觉到我确实应该承担这项任务。对此事进一步的推动出现在 2007 年, 当贾瓦哈拉尔·尼赫鲁纪念基金会给予我贾瓦哈拉尔·尼赫鲁项目资助时, 我得以开始这个项目。2009 年, 在孟买的尼赫鲁中心给了我两年的资助来继续该任务。我非常感激这些资助。我一开始是一名凝聚态物理学家, 但后来走进了天文学领域! 早年我对天文学最初的了解来自我的父亲, 但促使我去追求它并尝试去普及它的理念的, 首先是我杰出的老师, 芝加哥大学的苏布拉马尼扬·钱德拉塞卡 (Subrahmanyan Chandrasekhar), 后来是剑桥大学的马丁·里斯 (Martin Rees) 教授、阿姆斯特丹大学的爱德华·范·登·霍伊维尔 (Ed van den

Heuvel)教授和班加罗尔拉曼研究所的拉达克里希南(Radhakrishnan)教授。我非常感谢他们一直以来的热情激励。我还要特别感谢美国国家航空航天局、欧洲航天局和国际天文学界,在本系列著作中提供了精彩的图片。

加尼森·斯里尼瓦桑

目 录

当今天文学革命：概述 /1

20 世纪之初 /1

20 世纪巨大的跨越式发展 /5

新千年之初的天文学 /27

第 1 章 恒星是什么? /40

历史简介 /40

光球层 /48

太阳内部 /53

维里定理 /60

第 2 章 恒星气体球 /64

恒星理论 /64

流体静力学平衡 /64

太阳为什么会发光? /66

能 源 /68

第 3 章 爱丁顿的恒星理论 /80

辐射压 /80

辐射平衡 /84

恒星结构的基本方程 /87

恒星结构方程的解 /89

爱丁顿的质量-光度关系 /108

爱丁顿光度极限/114

第4章 为什么恒星是那样的?/119

恒星真的是理想气体球吗?/119

恒星中发生的事情/124

为什么恒星是那样的?/126

第5章 恒星中能量的产生/136

恒星中的核聚变假说/136

基本困难/137

隧穿势垒/143

解密中子/147

中微子/149

恒星内氦的合成/154

为什么太阳不会把自己炸毁呢?/162

证据在哪里?/164

第6章 太阳的声音/173

太阳标准模型/173

对流现象/176

太阳的声音/187

节点、节线和节面/191

振动球/194

日震学/198

南 极/201

全球网络/202

空间太阳天文台/202

检验太阳标准模型/205

太阳的自转 /210

日震学给出的太阳内部转动信息 /218

第7章 终于发现了铁证 /222

寻找铁证 /222

神冈实验Ⅱ /225

中微子-电子散射实验 /226

镓实验 /229

大气中微子 /231

回到太阳中微子实验 /233

萨德伯里中微子天文台 /233

终于找到确凿证据 /240

证据(枪上的指纹) /241

中微子确实在不同味之间振荡! /242

质量态和味态:量子振荡 /244

耦合单摆 /247

圆偏振光 /248

量子振荡 /249

物质中的中微子振荡 /254

结 语 /256

恒星能够寿终正寝吗? /257

推荐阅读 /259

索 引 /260

当今天文学革命：概述

2009 年被誉为国际天文年，这是为了纪念伽利略 400 周年前
首先用望远镜观测天体。400 年来，天文观测彻底改变了人类对天
体的认识。 1

4 个世纪后，我们又处在天文学的另一个黄金时代。太空时代
的到来为我们研究宇宙打开了新的窗口，由此产生了许多惊人的
发现并在认识天体的本质方面取得了前所未有的进展。与此同时，
许多新的和突出的问题也出现了。事实上，有明显的迹象表明，
一些难题的解决可能需要基础物理学本身的重大修改。

本系列著作打算展示现代天文学取得的激动人心的成就，并
可以当作读者了解当天文学革命的导论。可以这么说，本概述
的目的是告诉大家一些背景知识。在这个宽泛的纲要中，系统地
解释所有的东西并不是我的意图。本概述更像是一部即将上映电
影的预告片。我希望这个概述能充分地吊起大家的胃口，以致让
大家期待这个系列的其他各卷，从而知晓目前正在进行的更多天
文学革命。

20 世纪之初

科学革命意味着什么？有时，毫无意义或被认为是无足轻重
的问题会突然获得科学范畴内的意义。当这一切发生时，科学革命
就开始了。让我们回顾几个例子。当牛顿宣布应根据基本物理定律
来理解自然现象时，这就是一个革命性的宣言，而在这之前从没有
任何人如此断言过。牛顿关于自然法则具有普遍有效性的论断