

爱上科学

Science

World Scientific

Beyond the
GALAXY

How humanity looked beyond our Milky Way
and discovered the entire Universe

星河之外
宇宙真容探秘记

[美] Ethan Siegel 著 | 魏晓凡 译

中国科学院国家天文台研究员 **苟利军** 审校

北京天文馆专家 **詹想** / 天文科普漫画团队 **EasyNight** **联合推荐**



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

爱上科学

Science



星河之外

宇宙真容探秘记

[美] Ethan Siegel 著 | 魏晓凡 译

苟利军 审

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

星河之外：宇宙真容探秘记 / (美) 伊桑·西格尔
(Ethan Siegel) 著；魏晓凡译. — 北京：人民邮电出版社，2018.5

(爱上科学)

ISBN 978-7-115-46782-9

I. ①星… II. ①伊… ②魏… III. ①宇宙—普及读物 IV. ①P159-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第019708号

版权声明

Copyright © 2016 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. All rights reserved. This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system now known or to be invented, without written permission from the Publisher.

Simplified Chinese translation arranged with World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., Singapore.

本书简体中文版由 World Scientific Publishing Co. Pte Ltd. 授予人民邮电出版社在中国境内出版发行。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或节录本书中的任何部分。

版权所有，侵权必究。

内 容 提 要

人类在一百多年前，认为银河系几乎就是整个宇宙。随着科学的发展，曾经被认为的“全部”，变成了“部分”，又变成了“很小的一部分”，宇宙的真容从未像当今这样真实，而又仍有许多悬念待解……同时，大爆炸宇宙论、暗物质和暗能量等观念，也随着这一过程被不断熟悉。科学的探索、观念的演进——这本书就是通过天文这一话题，来演示二者互动的有趣过程，同时引领读者关切我们这个世界的过去、现在和未来。本书适合天文爱好者和其他领域的科学爱好者阅读。

-
- ◆ 著 [美] Ethan Siegel
译 魏晓凡
责任编辑 周 璇
责任印制 周昇亮
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京方嘉彩色印刷有限责任公司印刷
- ◆ 开本：889×1194 1/20
印张：10.6 2018年5月第1版
字数：342千字 2018年5月北京第1次印刷
- 著作权合同登记号 图字：01-2016-2945号
-

定价：89.00元

读者服务热线：(010)81055339 印装质量热线：(010)81055316

反盗版热线：(010)81055315

广告经营许可证：京东工商广登字 20170147号

译者序

这本书是一场科学盛宴，它的“食材”是宇宙，而它的营养叫“求真”。然而，求真要实践起来似乎并不容易：此间有天然的思维惯性或曰惰性作梗。出于各种原因，人纵然有了求真的志愿，也难免未晓求真之术；纵然已详其术，也未必能时刻铭记和遵行。因此，才需要读这样的书来自我教育，乃至再教育。星河之外，时空如此苍茫，最根本的“真”或许不是我们力所能及的，但追随各代先贤的步履，品味那个相对的、临时的“真”被一次次刷新的历程，品味理论与事实不断碰撞激荡中那条不变的准绳，无疑既是科学史的滋补，又是心智上的锤炼。译罢此书，我深感科学前沿的追求像一场光辉的“必败之战”：我们怀着求真的热情，向着一个无限远处的目标跋涉，并终将倒在路途中，但与夸父逐日不同，我们可以薪尽火传。科学之旅的荣耀，不只在于其能够成功，还在于其可以失败（具有“可证伪性”）——这失败本身更显示出其可贵。越是否定自己，越能坚挺屹立，这看似吊诡的说法，恰使科学卓然有别于迷信，成其为科学。

写此序时，霍金教授刚刚辞世，关于宇宙和人类命运的话题也刷爆了“朋友圈”。我想，霍金教授除去独特的外表，其实也是千万个真正科学工作者的缩影：他们对过，也错过，但不论如何总是对人类知识的开放性保持敬畏，同时又对自己身为“果壳中的宇宙之王”满怀骄傲。大概，只要还没放弃自我意识，就也还没远离这种情怀吧。或许文明终将消逝，但这求真的精神将与宇宙的“大真”永相呼应。人类求美、求善，亦很可贵，但能在更复杂的水平上不断体现这些美和善的，也许只有求真？求真有着如此摄人心魄的力量，以至于我们在这本宇宙认知的探索史中，时常能瞥见美与善的所在，乃至艺术女神的风姿。

当然，我不是科学主义者，也不认为求真是人类的唯一要务。求美、求善，同样是人类重要的追求。然而，要超越一个层面，也须先深入理解这个层面。若连如何构建和完善“真”都不清楚，就侈谈超越“真”，焉知那所得的是真美还是伪美？是真善还是伪善？求真的“正确打开方式”，是当代文明人绕不开的基础课。在我看来，这也是伊桑·西格尔老师在“星河之外”最想呈现给大家的“真容”。

魏晓凡，2018年3月

译者简介

魏晓凡，北京市人，文学博士，毕业留校，编刊为生。写过技术教程，上过电视综艺，钟爱天文多年，目前翻译成瘾。

序 言

我于 2009 年成为大学教授。当我拿到自己的第一份教学任务表，看到我将负责学校的“天文学导论”这门课时，不由得大喜过望。我回想起了自己从童真岁月到读完博士学位的过程中，一点一滴地学习关于宇宙知识的往事，也忘不了人类宇宙观在历史上的每次转变是如何让我感到震撼和折服。每一次转变，都意味着人类掌握了更加丰富、详细的知识，从而发现原有的宇宙模型只是新模型的一种近似；而新的模型在越发精密的测量与各种新观点的支撑下，已比原来更趋完善，更加深刻地接近了宇宙的真实样貌。我简直迫不及待要与我的学生们分享这些令我痴迷的故事——这些故事关系到人类如何认识并且不断地重新认识自己在宇宙中的位置。

不过，到了给课程班挑选教材的时候，我惊讶地发现，我居然找不到一种能真正讲好这些故事并且适合用作教材的图书，尽管这些故事是如此重要。市面上能见到的主要的天文学教程都太宏大、太庞杂，它们广泛地涉猎天文观测与设备、行星科学、恒星与星系科学的各个方面，乃至多波段天文学的数据分析等。对想成为专业天文学家的人来说，这些教材无疑是优秀的，如果未曾努力专攻过天文学课程，那么这些书可以给你打下坚实的基础。但是，在帮助学生逐渐学会如何去深入研究和解决多种类型的天文学问题的同时，这些教材也全都令人遗憾地轻视了一些内容，那就是：天文学的知识在人类眼中曾经是哪些样子，以及人类是怎样修正它们的。

既然找不到一种既有足够强的科学严谨性又能全面涵盖这些故事的教材，我就不得不去翻阅那些适合研究生阶段的、充满各类公式和方程的资料，以便了解天文学各个分支的最新进展，再从大众科学读物里找出一些更富有基础性的材料。搞到最后，我手头拥有的，仍然是一堆差强人意的零碎材料的集合。仅仅利用它们的话，并不足以讲好一个关于我们眼中的宇宙、我们怎样认识宇宙的完整故事。

在我看来，这些书本资料全都错过了天文学入门课程最应该讲的东西！诚然，我的学生中会有很少一部分人最终踏上专业天文学家之路，但其他大多数满怀兴趣地选了这门课的人最想了解和感悟的，只是那些应该被全人类共享的、关于宇宙观的恢宏的故事。对于学生在上完一个学期的课之后能在考试中解答出哪几类天文学考题，我是不太感兴趣：我想让学过这门课的学生不仅能领略和赞叹这个步步递进的关于宇宙观的故事，还能获得在科学道路上持续攀登一年、五年乃至十年或更久的勇气。我要带领学生们，

从他们最熟悉的观天状态，即站在大地上用肉眼进行最简单的观察开始，一直飞到当代自然科学知识的疆界。

这些故事，也就是关于我们所认识的这个宇宙，以及我们如何去认识它的故事，在过去的一百年里，大量、快速地增加着新的篇章。当我于 2014 年底完成这本书的写作时，我翻阅全稿，意识到：就在短短的一百年之前，世界上顶尖的物理学家和天文学家们还认为银河系中的全部恒星就是整个宇宙的所有成员，认为宇宙无始无终，在牛顿的万有引力定律的统率下亘古如常地运行。时代的变化之快，在这一百年里是多么让人惊叹啊。现在我们认识的宇宙，宏大到了含有多达上千亿个像银河系这样的恒星系统，它诞生于 138 亿年前的一次“大爆炸”中，在爱因斯坦广义相对论的描述中不断地膨胀并且冷却下去。不止如此，“爆炸”也不是绝对意义上的瞬间开始，因为“暴胀”阶段在“爆炸”之前已经发生（严格来说，我们日常理解的“宇宙大爆炸”中的“爆炸”仅适用于宇宙年龄 10^{-30} 秒之后，此前则被定义为暴胀阶段，详见第八章——译者注）。而我们所知的构成宇宙中绝大部分事物的质子、中子、电子，其对应的能量仅占宇宙全部能量的 5%，真正统治着如今的宇宙的，是我们无法直接看到的暗物质、暗能量。在这些知识的基础上，我们更真切地了解了宇宙的命运和人类的遥远未来将是什么样的境况。

可为什么每个对天文感兴趣的人在学习关于宇宙的知识时都很少接触到这些故事呢？我们又有什么理由不去了解我们认识宇宙的方法与过程呢？在大学里专修物理或天文的人，几乎全都错过了这一课！

这本书就是为了补上这一课而写。不论你是不是第一次学习有关宇宙的知识，也不论你是在学习导论性质的课程还是想通过宇宙观的发展史及其技术史、方法史去了解最新的研究进展，都可以读读这本书。我将从人类最早的求知探索写起，一直写到那些正在构建着我们当今对万物的观念的、最为重要的科学突破。我写这本书并不是为了解决什么前沿问题，所以书中也不会使用什么公式和方程（除了偶尔使用一下质能方程），而涉及数理关系时，我会用通俗的语言进行解释。

这将是一个关于我们眼中的宇宙的故事，也是一个宇宙向我们进行自述的故事。我们观察宇宙，向它提出一些足够正确的问题，然后我们就能有所长进。即便假设明天全人类突然忘掉了全部的知识，我们仍然可以通过这种简单的方式，一点点地把这些知识重新找到，然后再次积累起来。希望你能在这趟宇宙观的发展历程之旅中感到快乐，并能为这个无比宏伟的“大故事”由衷喝彩。

Ethan Siegel（伊桑·西尔），2014 年 12 月 23 日

目 录

第一章	很好很宏阔：20 世纪初人们心目中的宇宙	1
第二章	相对有新说：爱因斯坦重塑时空观和宇宙观	30
第三章	跳出银河系：跃入一个不断膨胀的宇宙.....	48
第四章	亘古大回望：给万物寻本溯源的诸多理论	67
第五章	元素初流传：恒星如何给宇宙赋予生机.....	84
第六章	直通最开端：历史通过一次大爆炸而揭幕	103
第七章	物质很重要：为何宇宙中物质多于反物质	118
第八章	追溯爆炸前：整个宇宙到底是怎么开始的	134
第九章	起舞幽寂中：暗物质与大尺度网状结构.....	158
第十章	极致收场时：暗能量与宇宙的生老病死.....	180
第十一章	古今与未来：我们所知的关于这一切的一切.....	201

第一章

很好很宏阔：20 世纪初 人们心目中的宇宙

不管你是哪里人，如果要你说出天空中最明显、最重要的一样东西是什么，你很可能会说是太阳。那么，请想象一位最早从赤道地区迁出，移居到远离赤道的地方（不妨假设是向北移居到中纬度地区）的先民吧。他会发现，太阳不再像在终年温暖的赤道时那样了。赤道地区的太阳每天几乎从正东升起，经过头顶上方到几乎正西的位置落下，且全年都不会有太多变化。而中纬度地区的太阳呈现出了更为复杂的运动规律：在春季，还有夏季的前半部，白天持续得会比在赤道上更长，太阳升起和落下的方位也都比在赤道上更偏向北边，中午时分太阳依然从高处经过，但位置稍向南偏。而到了秋后和初冬，白昼就会明显变短，太阳的升落点也会越来越向南偏移，中午时候它的高度也会一天比一天略低。同时，黑夜明显变得比白昼更长了，天气也在逐渐变冷，预示着严冬的到来。这位先民此前从未见过这些现象，所以难免焦虑万分，生怕正午太阳的位置会像这样一天比一天更向南方低垂，最终有一天不再出现在地平线上。

实际上，只要你不向北进入北极圈内，这种“噩梦”就不会成真。每天现身时间越来越短、最大高度也逐次降低的太阳，会在冬天的某一天达到“极限”，此后的情况就不会“恶化”了。太阳会在这个极限水平上重复运行几天，这就是所谓的“至日”（拉丁文 solstice），意思是“太阳的驻留”。此后，太阳每天都会比前一天走得更高一点，这也预示着新的一年就要开始了。夏天还会再次来临，白昼长于黑夜的日子又会回来。（见图 1.1）

当然，上述故事不一定真的有过，你把它当成人类学家的臆想也没问题，但它确实地昭示了天文学的起源方式。也就是说，这门宏大而严肃的学问，发端于人类的观察经验。我们通过对宇宙的精细观察与测算，可以认识其中的许多现象，而通过身处不同地点的许多观测者对这些现象的重复观测，人们就掌握了关于各种天象的日趋完备的数据。依靠这些数据，可以总结出一些规律，让人们能根据已经发生的天象去推算未来将要发生的一些天象。

这只是一种雏形的、基础的知识体系，要知道，它与我们当今所认识的“科学”之间还差着很关键的一大步：创建一个能够合理容纳这些观测事实的、物理学的理论框架。

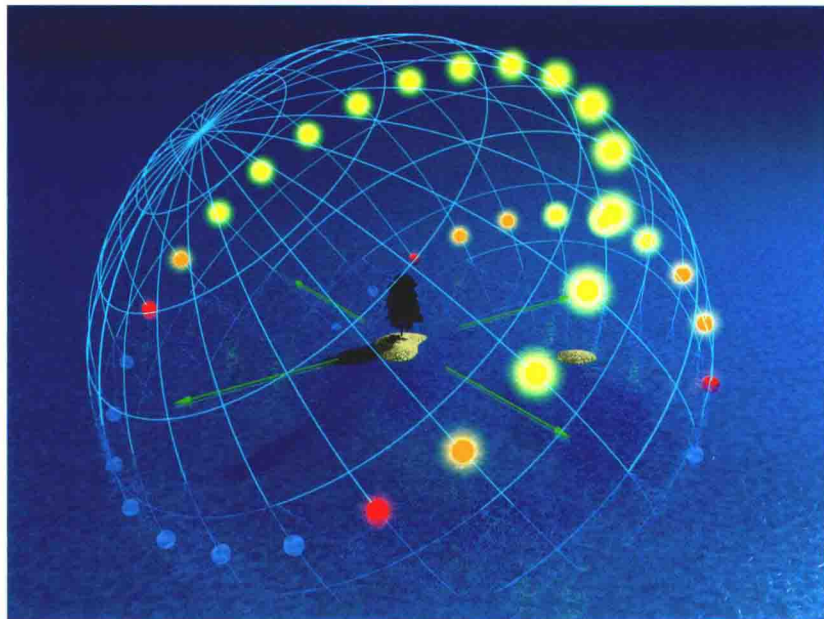


图 1.1 在中等纬度的地区，夏至这天，太阳的升起方位和落下方位是一年中相对最接近天极的，而正午时分太阳的高度也是一年中最高的，这天的白昼时间也会达到全年的最大值。此后，太阳的运动路径就会一天天向另一端的天极靠近，白昼时间逐渐缩短，直到冬至这天达到极小值。冬至过后，太阳的路径会重新向夏至时所靠近的那一端接近，白昼也再次逐日增长。这个过程每年会重复一次。（图片版权：Wikimedia Commons 用户 Tau'olunga, CC 2.5 相同方式分享）

当黄昏结束，野外的天空黯淡下来之后，只要净朗无云，就可以用肉眼轻松看到数百颗星星。如果是无月的夜晚，这个数字甚至可以升至上千。不论你在地球表面的何处，都会看到这些星星整夜地缓慢移动：这些镶嵌在穹庐般的天幕上的小亮点，会绕着特定的位置转圈，这样的“特定位置”共有两个，即北天极和南天极。这种转动天天如此，恒星之间的相对位置，以及它们构成的图形，好像也永远不变，而它们的亮度似乎也万年不改。在北半球，这幅星空景色一直绕着北天极逆时针运动（在南半球则是绕着南天极顺时针运动）。所以，大部分星星也跟太阳似的，大致上从东方一带升起，在正南或正北的某个点达到最高，再从西边一带落下。在有月亮的夜晚，也可以看到月亮有着类似这样的运动轨迹。

这些现象到底是怎么发生的？早期大多数科学家的解答几乎都是直接基于我们看到的画面而给出的：在大地上空，笼罩着一个巨大的、无色透明的球壳，所有天体都镶嵌在这个球壳上，而这个球壳绕着固定的自转轴旋转，于是我们就能看到每天的日升月沉、星宿轮回。这种解释相当简洁，而且与对各种天体的观察经验几乎都能吻合，因此堪称科学理论的一个伟大开端。不过它称不上是严格意义上的科学理论，因为它有一个很大的缺陷：它无法被用来分析天体运行的内在机制。在观察资料的基础上，我们无法运用它去预报并检验天象，所以，尽管它相当诱人，我们还是需要新的理论。（见图 1.2）

真正的科学不会满足于知道发生过什么、将会发生什么，它还想知道“为什么发生、如何发生”。所以，我们对观察到的现象，除了记录下来，还要寻求解释。这就要求我们建立一套物理学理论来承担这个任务。依据物理学理论，我们可以对未知现象做出预言，然后经由实验或观测去检验这些预言，进而认可、修订或否定相关的理论。对像太阳这样明显地运行在天上的单个天体来说，做太多观测上的解释或许显得多余、无用，但若将注意力转向太阳落山之后，让科学的眼光射向星空，那么一个全新的宇宙即将呈现。

显然，人们不难构造出另一个看起来同样易于理解和接受的理论。在地球表面的观察者看来，天上的日月群星集体旋转升落，除了可以意味着有一个旋转的球壳之外，也完全可以意味着这个球壳其实是固定不动的，而在不停旋转的应该是我们栖身的这片大地。诚然，单凭对天体运动情况的观察，没有办法辨别这两种思路究竟哪一个更正确，但是必须指出，在毕达哥拉斯及其学派存在的那个时代，不只是他们，许多科学家与哲学家都倾向于认为第二种观点是对的。不过，由于缺少一种可行的检验方法，也就是说，由于这两种理论并不能做出哪怕一点点彼此不同的预言，我们也就

无法彻底判明孰是孰非。在这种情况下，我们还是确立不起一种“科学理论”。但不管怎么说，这些并不知道正确与否的假说，已经与人们观察到的天空现象一起，从这个时候开始，长期存留于一代代人的头脑之中了。这让人们关注宇宙，也关注自己在宇宙中的角色和位置。出于对构建宇宙观的渴望，人类尽己所能地把观测越做越细，收集着更多的信息。

* * *

我们应该知道，太阳和月亮并不像众多星星那样呈现长期固定的位置关系。随着每天的升落轮转，太阳和月亮相对于群星背景的位置会发生明显的变化，其中，月亮的这种变化尤为明显，而且比太阳明显得多！如果你在某天晚上一个特定的时刻测定了月亮的位置，而在第二天晚上的同一时刻再次观察月亮的位置，就会发现两者相差大约 12° 。这个距离是多大呢？若你向前伸直手臂，并如图 1.3 所示那样向外伸出食指与小指，则这两指的尖端此时在天空上比出的距离差不多就是 12° 。与月亮类似，太阳相对于背景群星的位置每天也在偏移，只是幅度偏小，但这也足以解释为什么我们每天晚上看到的星空都比前一天偏移一点，由此显示出不同季节的不同星空图景。按平均程度说，逐日偏移幅度最大的恒星，每天在特定时刻的位置大约比 24 小时之前的位置偏移约 1° 。

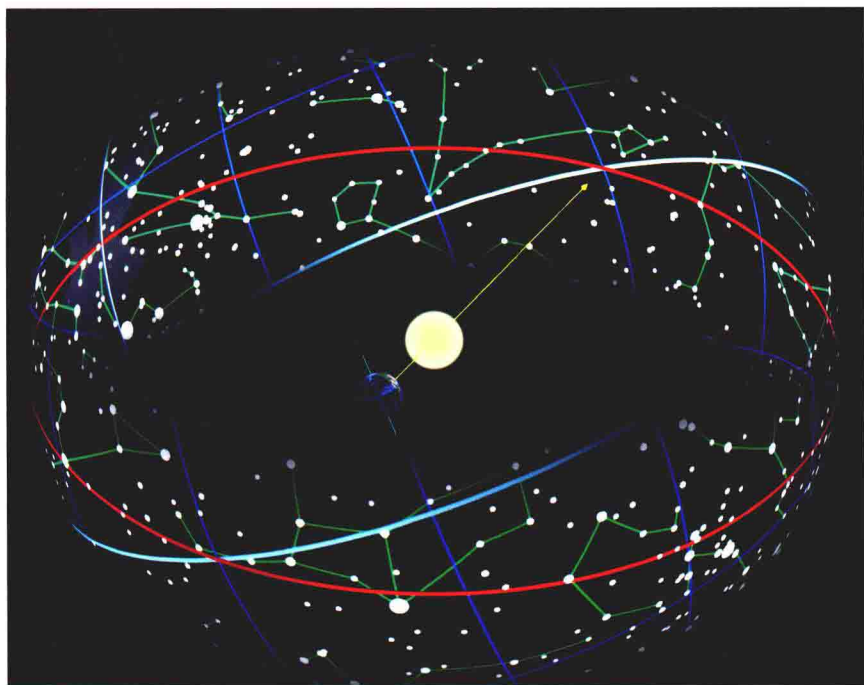


图 1.2 在地球看来，所有的恒星似乎都镶嵌在一个很高很远的球形天幕上。当然，只有与太阳相反的一侧才能被观察到（即在夜间）。不过，在地面观察者眼里，究竟是群星在绕着地球转，还是地球在自转，以及究竟是太阳绕着地球转，还是地球绕着太阳转，都并非一目了然。（图片版权：本书作者，基于 Wikimedia Commons 用户 Tau'olunga 的图片修改）

这样，每当季节轮回一周（365天，近乎360天），晚上特定时刻的星象也轮回一周，太阳则在天球的背景群星中游走了一周。



图 1.3 对比左右两图，以恒星背景为参照，移动幅度很大且非常亮的天体是月亮，相对位置改变较小的两颗亮星分别是金星（稍左者）和木星（稍右者）。图中的手是本书作者的，伸出的两根手指的尖端比画出了大约 12° 的角距，这正是月亮每 24 小时在天幕上移动的幅度。（图片版权：ESO/Y. Beletsky）

不止如此，太阳、月亮之间看起来还以一种有趣的方式发生着联系，那就是月相的变化。每当太阳、月亮在天球上的位置彼此接近时，月亮总是呈现细瘦的月牙状。从农历每月的月初起，“新月”的月牙会在十余天内由西侧向东侧逐渐丰腴起来，亮度也在逐日增加。到农历月份的正中，就出现满月，月亮的轮廓呈现为充盈、完美的圆形。这半个月的过程称为“渐圆”（waxing）。当然，满月过后，月亮会立刻开始一天比一天盈亏的过程，即“渐缺”（waning），它以相反的半边，由西侧向东侧细瘦下去，这个形状变化过程也正好与“渐圆”相反。这样又用掉半个月的时间，月亮在天幕上逐渐接近太阳的位置，回到很细的“残月”月牙。最终它会消失、看不见，随后又从太阳的另一侧变成新月，开启下一个月相循环。

因为太阳、月亮在群星背景上移动，我们就以群星作为参照物，去记录太阳、月亮位置的变化。尽管如此，太阳、月亮的运动与众多恒星之间，其实可以说没什么实际关联。我们已经知道，月亮与我们的距离，远远小于群星与我们的距离。所以，当我们看到月球的位置在天空中与特定的恒星重合时，月亮其实并未碰到那颗星，而只是挡住了那颗星向我们发出来的光，这叫作“月掩星”（occultation）。我们也很容易做出如下的正确判断：月相变化不是月球本身的形状变化，而是月球反射太阳光给我们造成的一种视觉效果。当呈现满月时，以地球为基准，月亮只是位于太阳的反侧，所以它此时反射着阳光的那半面正好都能被地球上的人看见。相反地，在残月与新月之间的那一两天，我们之所以看不到月亮，也只是因为相对于地球而言，月亮运行到了与太阳相同的那一侧，

我们看到的正好是它此时没能反射阳光的那半面。当然，这同时也能说明月球与地球的距离小于太阳与地球的距离。（见图 1.4）

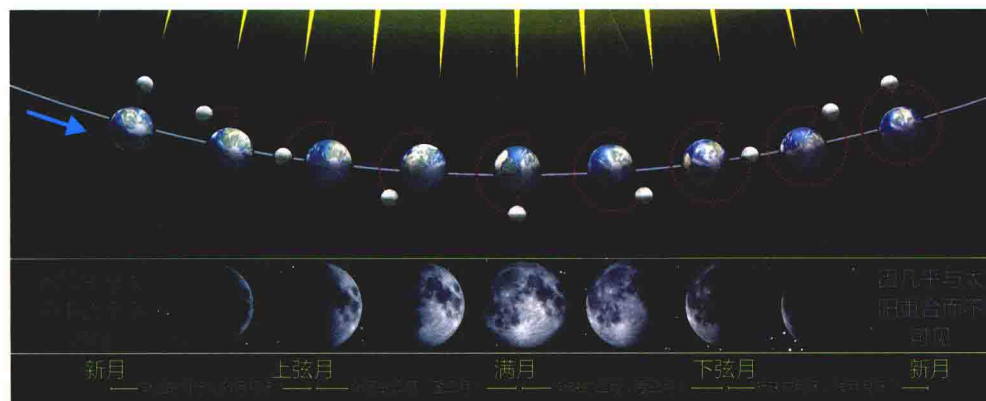


图 1.4 与太阳的距离相比，月球离我们是很近的，它也是离我们最近的星球。月球朝向太阳的半面会反射阳光，这造成了我们看到的月相变化。大约每过一个月的时间，月球绕地球一圈，月相的盈亏变化也会循环一遍。注意，月球的圆面总会挡住位于它后面的星星，即使是不发光的部分也会起到遮挡背景恒星的作用。（图片版权：本书作者，基于 Wikimedia Commons 用户 Orion 8 的原创，CC 3.0 相同方式分享）

你可以想象在一条走廊的一端，有一只灯泡发出极强的光。我们暂且将这灯泡比作太阳，将你的头部比作地球。此时你若朝着灯泡的方向伸出手臂，且手里拿着一个小球，则这个小球可以比作月亮。如果你调整手臂的朝向，稍向左转，让“太阳”位于手臂前方的稍右一点，你可以看到什么现象？你会看到“月亮”表面有被“太阳”照亮的区域，但你能看到的亮区只有小球右侧的一小部分而已，这部分正好形同月牙，而其余部分都未反射“阳光”，它们对应于月球的“暗面”。如果将手臂转向更靠左，即可看到“月牙”逐渐丰满起来，“暗面”则逐渐退出你可见的一面。当手臂方向与“太阳”成直角时，小球朝向你的一面中，亮、暗也正好各半（这就是月相中的“上弦月”）。而如果将小球移到与灯泡相反的方向，你回过头即可看到它的几乎全部亮面——当然，这里有个条件是，你的影子不要挡住本来可以照到小球上的灯光。假如你转身让“月亮”继续从另一侧转回出发点，就可以看到它从“满月”经过“下弦月”变成“残月”月牙的过程。这个演示过程，不仅说明月球绕地球的运转是月相变化的成因，也向我们揭示了历法中的“月”（month）这个概念的来源。月相完成整个变化轮回的周期，平均需要 29 天的时间。（见图 1.5）

不难注意到，如果独自完成这个演示过程，则其中有两个时刻比较特别，它们可能导致光线的特殊遮挡。第一个是“月亮”从“地球”（你）和“太阳”之间穿过时，“阳



图 1.5 如果你设置一个光源，把它放在离你较远的地方，用单手举起一个圆球然后原地转圈，就可以模拟出在地球上看到的月相变化，包括新月、上弦月、盈凸月、满月等阶段。（图片版权：本书作者）

光”可能被“月亮”挡住，无法直射到你的眼中。第二个则是刚才提到的，“月亮”在“太阳”的反侧时，你的头可能挡住“阳光”让“月亮”无法接受直接照射。在实际的宇宙中，这两类情况也可能发生，但不是每个月都会发生，而是平均每年发生大约两次——这就是日食和月食。为何不是每个月都有日食或月食呢？这缘于“地球绕太阳的轨道”与“月球绕地球的轨道”二者并不重叠——它们不在同一个平面上，两者相差最远处可以在天幕上反映为大约 5° 的距离（伸直手臂，将食指、中指、无名指并拢，

其总宽度即大约 5° ），而太阳、月亮在天空中占的直径大约只有 0.5° （伸直手臂后，小指宽度的一半）。农历的月份相交的时候，月亮在天幕上的位置确实看起来离太阳很近，但大多数时候都从太阳的上方或下方“飞掠”了；而农历满月时，月亮在大部分情况下也会与地球投射在太空中的影子（无法被直接看到）“擦肩而过”。这就是日食和月食数量偏少的最主要原因。但是，月亮每年至少有两次会接近上述两条轨道各自所在平面的交点，从而在地球表面投下影子，让地球上某些区域的人看不到直射过来的阳光（至少是直射阳光中的一部分），因此日食每年至少发生两次。由于地球、月球具体运行规律的一些复杂的细节，每次出现日食，月球挡住太阳的形式也可能不同，主要可分为三类，下面做一详细介绍。

（1）**日偏食**。当太阳、月亮的相对方位让人无论在地球表面的什么地方，最多只能看到月球遮挡太阳圆面的一部分，这样日食就称为日偏食。由于太阳光的照度实在太强，即便是挡住太阳圆面达 90% 的偏食，也不会让人察觉到天色明显变暗，此时的太阳虽然成了“日牙”，但依然光辉夺目、难以长时间直视。当然，日偏食发生时，你可能会感到来自太阳的热量明显减少。而接下来要介绍的两类，都比偏食更加有趣。

（2）**日全食**。这个名字意味着，在特定的某些地点看来，月球的圆面能完全遮住太阳的圆面。这种天象发生时，若从太空中看去，能见到一条深暗的“影锥”从月球背向太阳的那一面伸向地球，并划过地表。被暂时笼罩在影锥里的人，则能看到天空暗下来，如同平时日落之后不久的颜色，还能在太阳周围看到平时难得一见的“日冕层”，并在这个白昼时间段内轻易看到一些比较亮的星星！日全食的发生要求太阳、月球、地球三者的位置关系同时满足两个条件：一是三者正好位于同一直线上，二是月亮离地球正好足够近，以致地球上看到的月面直径要略大于日面。其实，月亮离地球最近和最远的时刻，每个月就各有一次，所以，只要观察得足够仔细，就不难注意到月亮在相隔一段时间后，

看起来的直径会略有变化。太阳离地球最近和最远的时刻则是每年各有一次，其间也会有这种变化，但不如月亮明显（译者注：无论提醒多少次也不为过——请不要去直接观看耀眼的太阳，这对眼睛的伤害非常严重！）。

（3）**日环食**。如果上述的日全食的两个条件中只有第一个能满足，则会发生日环食。这意味着太阳、月球、地球三者仍然要处在同一直线上，但月球正好离地球较远，所以地面上看到的月亮圆面直径不足以全部遮住日面。由于月球的圆面会完整地在太阳圆面的“内部”经过，太阳会在一个短小的阶段内呈现环状。若在太空中观察这种天象，就可以看到月亮的影锥虽然伸向了地面，但是长度差了一点，锥尖未能接触到地面。理论上说，若环食发生时，有宇航员从月球的影锥中飞过，则他可以观赏到日全食而非日环食。（见图 1.6）

说完日食，来说说月食。这是满月从地球的影子里经过时发生的。日食依靠的是月亮的影子，只能被地球上白昼那面中特定的一部分地区看到；而月食更容易被更多的人看到，因为它依靠地球的影子，所以地球上处于夜晚的那面都能看到（译者注：不考虑云层遮挡）。而如果太阳、地球、月球三者所成的直线并不严格，则月球可能只有一部分进入地球那深暗的影锥，结果只会使圆月的一部分变暗，这就是月偏食，也就是地球并没有完全挡住射向月球的日光。因此，如果三者更完美地呈一直线，则月面会完全浸入地球的暗影，这就是月全食了。

对于首次认真观看月食的人来说，有三件事会让他们觉得很有意思。第一，月全食持续的时间很长。日全食或日环食前后虽然也有较长的偏食阶段，但全食或环食状态最多只能分别持续 7 分 30 秒或 12 分钟。相比之下，月全食的状态最长可以持续 1 小时 46 分钟！有人可能觉得，月亮钻进地球的影子中就看不见了，没意思，但其实，即便是处于全食状态的月亮，也是能看见的：它会呈现一种黯淡的褐红色，这堪称第二件趣事。这里的褐红色微光基本仍是太阳光，但不是直射光，而是在地球上那些处于晨、昏时间段地区的高层大气中经过了折射的光。由于日光中偏蓝色的成分折射率比较高，都被大气层中的气体分子打散了（译者注：形成了天空的蓝色），所以就剩下了更多偏红色的光继续前进，这些剩下的光微微照亮了此时正被挡在地球后面的月球。正因如此，月球

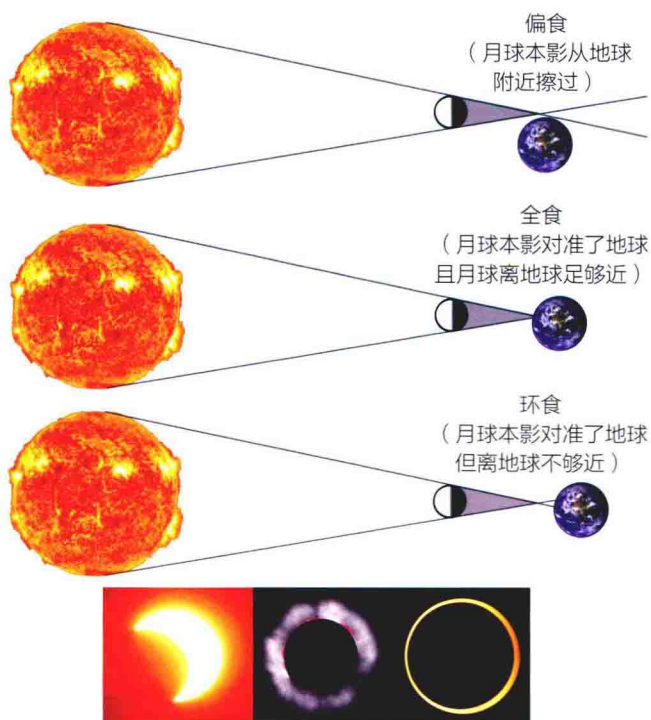


图 1.6 从地球上看去，当月亮挡住了太阳圆面的一部分时，就是日偏食。当月球的本影直接划过地面时，在本影所划过的地带之内的观察者能够看到月亮的圆面比太阳大，所以太阳会完全被月亮挡住，即日全食。但如果月球此时离地球恰好比较远，其圆面看起来就会小于太阳，这时只能看到日环食。不论是日全食还是日环食，如果你的位置只是邻近被月球本影划过的地带却没有在这个地带之内，那么你能看到的还只是日偏食。（图片版权：本书作者）

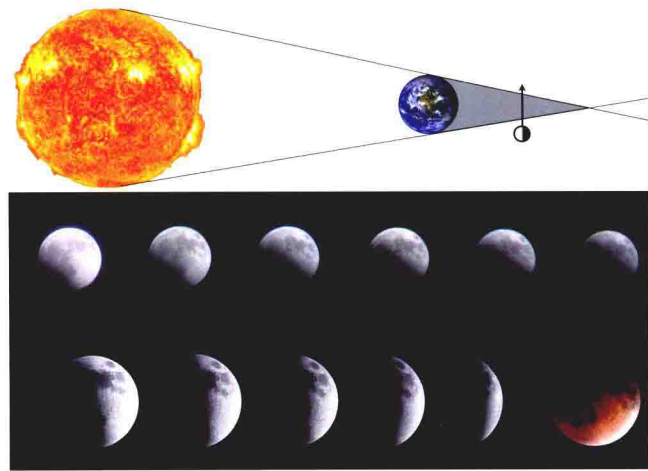


图 1.7 由于地球的影子很长，远大于月球和地球的距离，所以月食不包括“月环食”，只有月全食和月偏食。月全食时，完全浸没在地球本影中的月球，其表面会变得暗淡并显出棕红色。月偏食（或者月全食前后的偏食阶段）时，地球影子的轮廓一部分会投射在月球上，显示出一个大致的圆弧形，意味着地球是圆的。（图片版权：上半部为本书作者，下半部的月食各阶段照片为 Wikimedia Commons 用户 Zaereth 和 Javier Sanchez）

进入地影越深（即越接近全食阶段的中心时刻——“食甚”），杂散的蓝光的影响就越少，红色也就越明显。至于第三件趣事，或许会让很多人觉得比前两件更让人惊奇：古人可以利用月食来测算大地的形状！在月全食前后的偏食阶段，大地轮廓的一部分会被投影在月球上。如果能精确地描绘、记录下这个轮廓线的形态，就能仅凭观察投影而知道大地的形状。不出大家所料，如同太阳和月亮，大地的投影也是圆形的（见图 1.7）。

但是，一个圆形的影子，能表示大地有着什么样的实际形状呢？从几何理论上讲，答案可以有很多种，当然其中有两种解释是最为简洁的：

第一，大地是圆形的盘状物，所以它阻挡从太阳射向月亮的光时，会在月球上投影出一个圆形；

第二，大地是球形的物体，所以它阻挡从太阳射向月亮的光时，会在月球上投影出一个圆形。

这两种思路在几何上都是正确的，所以单凭观察投影的形状无法评断出二者的正误。由于大多数人都默认星空

的轮转是天空绕着大地运行所造成的，所以假设大地是个圆盘的形状，并没有太大的问题。在现存最早期的书面文献（包括古希腊和希伯来文本记录）中，大地都被描述成一个圆盘，周遭被汪洋大海围绕着。

但是，也有不少的间接证据表明，大地可能是球形的，而非圆盘形。同时，不少观察经验也倾向于表明大地的表面是个曲面，而非平面。例如，你盯着一艘离港远去的船，会发现它的船身最先消失在海平线以下，然后才是桅杆。若大地和海洋都是平面的，这种现象就说不通了。又如，爬上一座高山，向四方张望，也只能看到有限远的地方（即使地表没有任何障碍遮挡），但这个限度在哪里，是与你所在位置的高度有关的，站得越高就能看得越远。再如，向南方航行，越靠南就能在夜空中看到越多的北方地区看不到的星星，其中还包括一些不见于北方夜空的“深空天体”，例如“麦哲伦星云”（见图 1.8）。所有这些，都是“大地球形说”的绝好证据。不过，即便站在高山之巅，肉眼也确实还不足以分辨出大地表面的弯曲特征，于是，依然有许多人据此认定大地是扁平的圆形，以迎合自己的成见。在上千年的历史时期里，圆盘状的大地一直是占据着主流地位的一个教条。

可是，即便早在公元前 3 世纪，也有人并不相信大地扁平掌说，并且几乎证实了大地是球形的。不仅如此，还有人实地测量了这个球有多大！当时，世上的顶级学者基本都生活在埃及的亚历山大城，那里有传说中的亚历山大图书馆，一位来自希勒尼（Cyrene）的叫埃拉托色尼的学者也在其列。希勒尼是个属于希腊文明的城市，地点在今天的利比亚境内。希勒尼的纬度与亚历山大城基本相同，所以我们估计埃拉托色尼无论是在希勒尼的时候还是在亚历山大的时候，他的观天经验应该都差不多。可是有一天，他接到的一封信却震惊了他。这封信来自象岛

（Elephantine Island）的塞尼（Syene）城，此城位于埃及的南部，在今天的阿斯旺。信中描述说，每年夏至这一天，太阳的光都会径直照射进城里一口深井的底部。埃拉托色尼当然知道，太阳在天空中走过的路径会随着季节变化而改变，冬至前后相对最接近地平线，而夏至前后的中午高度会达到极大。但是，他也认为太阳从来不可能到达头顶正上方，以至于直接照进深井的底部——至少这在亚历山大城不可能。所以，他为这个描述感到震惊和难以置信。

不过，这封信的作者言之凿凿，在象岛的夏至前后，太阳就是会经过天顶，所以在那个时候如果你想伸头去看井底的阳光，头的影子就会把井底的阳光挡住。同时他还说，在夏至的中午时刻，如果在塞尼城的地上钉一根完全垂直于地面的桩，这根桩将不会有影子，无论从哪个方向看去，阳光都洒满在地上，这也是太阳正好位于天顶的绝佳证据。

埃拉托色尼就此制定了一个实验计划：他在第二年的夏至这天，在亚历山大城也钉下了这样一根正好垂直于地面的桩，然后在正午时分尽最大努力精确测量了桩影的长度，这等于测出了此时阳光的方向与垂线之间的夹角——这个夹角的度数，就是亚历山大城在夏至的正午时分，太阳的位置与天顶相差的度数（或说角距）。

埃拉托色尼的测量已经发挥了当时仪器设备的最高水平，他测出的结果是：夏至正午，桩影最短时，在亚历山大城，阳光的方向与桩（即垂线）的夹角等于整个圆周的 $1/50$ 。因为圆周等于 360° ，所以不难算出在亚历山大城的夏至正午，太阳离天顶为 7.2° 。而如果塞尼城的来信所述属实，则塞尼城的这个夹角数值应该是 0° 。

那么，这种差异因何而出呢？（见图 1.9）

埃拉托色尼意识到，如果大地是个扁平的圆盘，就不应该有这样的差异。而只要



图 1.8 大麦哲伦星云和小麦哲伦星云。由于地球是圆的，在位于北半球中纬度地区的欧洲，人们是无法看到这两个天体所在的天区升出地平线的，所以过去几乎不为欧洲人所知。现在我们知道这两个叫作“星云”的天体其实是像我们的银河系一样的星系。（图片版权：Wikimedia Commons 用户 Markrosenrosen）

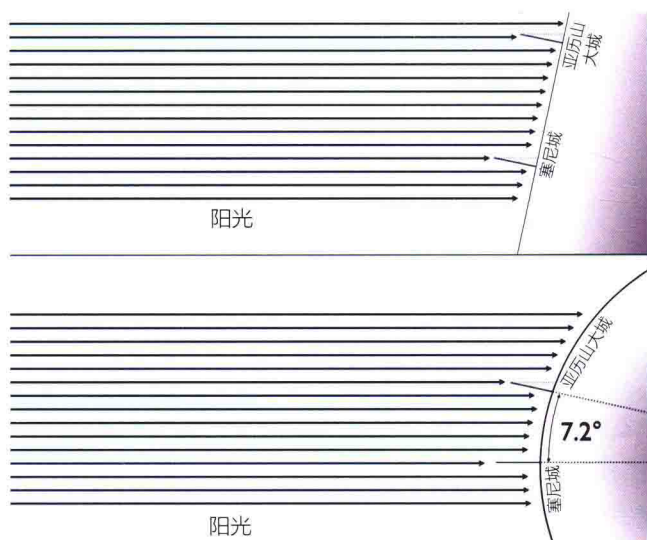


图 1.9 上半部：如果大地表面是平的，那么夏至的中午无论你在哪里，阳光投射到地面上的角度都应该是一样的。下半部：大地表面实际上是个球面，所以即便在同一时刻，不同纬度的人看到的阳光角度（即太阳在空中的位置）也会不一样，这就造成了文中所说的影子长度不一样的问题。通过测量两个经度相同、纬度不同的地点之间的距离，以及测量其同一时刻阳光角度的差异，就可以推算出地球的周长。（图片版权：本书作者）

假定太阳离地球很远，其发射到地上的光线就应该被视为近乎平行线的光束，这就意味着，大地是球形就解释得通了！或许是灵光一现，埃拉托色尼领悟到：既然亚历山大城、塞尼城两地接受的阳光角度相差 7.2° ，即圆周的 $1/50$ ，那么只要能测出塞尼城比亚历山大城靠南多少，再将此数值乘以 50，就可以得出球形大地的周长了。

假如埃拉托色尼是最早的研究生导师的话，他的学生恐怕就能以此为题，漂漂亮亮地完成历史上第一篇哲学博士论文了吧（译者注：西方对天文学专业的博士生授予的通常是哲学博士学位）。但是，当时既无“导师—研究生”制度，也没有测量两地之间精确距离的很好的方法，所能使用的最佳手段只是通过骆驼从一个地方走到另一个地方要耗费多少时间去估计总的里程。亚历山大和塞尼之间的距离，当时最精确的估值是 5 000 斯塔迪亚（stadia），所以埃拉托色尼估计地球的周长是 250 000 斯塔迪亚。这又是多长呢？我们只需一个简单的换算将其转化为“千米”之类的当代长度单位。但是，斯塔迪亚和千米之间的换算

率是多少，史学家们一直有所争议。前文已述，埃拉托色尼是个居住在埃及的希腊文化人，所以他既可能使用当时雅典的斯塔迪亚，也可能使用埃及的同名单位。这个长度单位的名字源自当时体育竞技场的长度，而各地竞技场的长度并不相同。如果按希腊标准，1 斯塔迪亚合今天的 185 米，那么埃拉托色尼推断的地球周长就是 46 620 千米，只比今天公认的数值 40 041 千米大 16%，可谓相去不远；而如果按埃及标准来算，这个单位更小，仅合当今的 157.5 米，那么埃拉托色尼的得数就将是 39 375 千米，只比当今的公认值小 2%！

目前已知埃拉托色尼这次伟大的测算进行于公元前 240 年。他由此成了已知最早的采用定量研究手段的地理学家。他不仅相当精确地度量了他心目中的那个地球，也建立了当今经纬度概念的雏形。他留下的资料含有当时世界上不少于 400 个城市的精确位置描述，这些描述都服从于一套自洽的、客观的地理方位概念。他甚至还划分了大地上的五个气候带：围绕两极的各一个冰冻带、南北两个中纬度地区的各一个温暖带，以及赤道地区的一个炽热带。所以，他可以称得上是地球科学与地理科学的奠基人。