



PKU
Youth Astronomy Society
Since 1990

北京大学青年天文学会（学生社团）出品

THE GUIDE FOR YASERS 青天指南

2021 年 9 月 第八版

《青天指南》（第八版）编委会 / 编

北京大学青年天文学会（学生社团）出品

青天指南

THE GUIDE FOR YASERS

2021 年 9 月 第八版

《青天指南》（第八版）编委会 / 编

写在前面的话

您现在阅读的这本《青天指南》是初创以来的第八版。

自第七版修订完成以来，《青天指南》得到了青年天文学会同学们的大力支持，它在为新会员普及基础天文知识等方面做出了巨大贡献，并一度成为会内培训所使用的教材。五年来，一届又一届的新会员读着《青天指南》，成长为社团的中坚力量，将社团的接力棒代代相传，将天文知识带给越来越多的北大同学。《青天指南》无疑在青年天文学会发展史上写下了浓墨重彩的一笔。

但是，第七版在版式、页码等方面存在一些不符合书籍规范的小问题，部分内容也已经过时。同时，由于保管不慎，其 Word 源文件已经灭失，导致学会无法对其内容进行调整。于是，我们决定重新编写新一版的《青天指南》。

《青天指南》第八版保留了第七版的框架，但内容有较大变化：

- 使用 L^AT_EX 引擎进行排版，对部分版式进行了修改，使版面更为美观，同时也方便后人进行修改；
- 增加了《时间、历法与星空文化》《恒星》《太空探索》等章节，并重写了其他章节；同时重新绘制了第七版《青天指南》中部分不清晰的插图，并增加了许多必要的新插图；
- 在每章最后增加了补充阅读材料，供对相关内容有兴趣的读者参考。由于成本限制，补充阅读仅在电子版《青天指南》中提供，纸质版中不再印出。

本版《青天指南》兼顾理论知识和观测实践，更加全面、系统；通过“正文 + 补充阅读”的形式兼顾不同水平读者的需求；同时，我们采用了专业的 L^AT_EX 排版引擎进行排版，图片清晰、版面美观，力求达到出版效果；电子版中使用了 hyperref 宏包，让 PDF 文件特别适合在电子设备上阅读，读者可以通过目录、交叉引用等快速跳转到想要阅读的章节。希望本次修订能够解决《青天指南》第七版的诸多不足，为向全校同学乃至全国人民普及天文知识贡献一点绵薄之力。

第八版《青天指南》的编写历经了一整个暑假，共有 21 位青天会骨干参与了编写工作。他们是（排名不分先后）：刘韞滕、田茗羽、包涛尼、孙宇辰、孙博勋、杜

骏豪、张天明、陈泽晖、林熠伟、郑宇涵、滕一鸣、王浩宇、李想、宋佳讯、张亦松、周钜宸、周瑞、郝宝栋、凌晨、杨礼铭、赵鑫森。其中，凌晨、刘韞滕、杨礼铭参与了第一章《星空导览》的修订，陈泽晖、孙宇辰、田茗羽编写了第二章《时间、历法和星空文化》，林熠伟和郑宇涵重新编写了第三章《天文望远镜》，张天明、宋佳讯和郝宝栋重新编写了第四章《太阳系》，刘韞滕、李想重新编写了第五章《特殊天象》，包涛尼、孙博勋、滕一鸣编写了第六章《恒星》，张亦松修改了第七章《深空天体》，杜骏豪和王浩宇编写了第八章《太空探索》，周瑞和周钜宸修改了第九章《资源》，刘韞滕和李想重新编写了第十章《青年天文学会简介》。同时，陈泽晖、刘韞滕、包涛尼完成了全书的排版工作，包涛尼设计了本书的封面。学会对参与本版编写的青天会骨干们，以及前几版的编写、修订者们，乃至创造这些知识的一代又一代天文学家或爱好者们表示真诚的敬意。

实际上，真实的天文比《青天指南》更加广阔。如果读者想要了解更多有关天文的内容，我们在《资源》一章中提供了更多的途径，希望读者能精勤观天，广泛阅读，积极交流，相信你会学到更多。

读者可以扫描右侧的二维码或通过以下链接阅读或下载本版《青天指南》的电子版：<https://pkuyas.github.io/qtzn/web/viewer.html>。

本版《青天指南》编写的主要目的是分享知识。因此，在著作权上，依照 Creative Commons 版权协议，我们希望您在使用本《青天指南》时，能够做到署名（BY）、非商业用途（NC）和相同方式共享（SA）。同时，由于编写者水平仍然有限，《青天指南》中难免有疏漏、谬误，读者可以发送邮件至 pkuyas@126.com 向我们提出意见，我们真诚地对每一位读者的来信表示衷心的感谢。



北京大学青年天文学会（学生社团）

《青天指南》（第八版）编委会

2021 年 9 月

最后编译日期：2022 年 2 月 20 日

目录

写在前面的话	i
目录	iii
第一章 星空导览	1
1. 夜空概述	1
2. 天球与星座	2
3. 恒星的命名与亮度	6
4. 太阳系天体	8
5. 如何观星	9
6. 如何阅读星图	11
7. 天体的方位与度量	17
第二章 时间、历法与星空文化	22
1. 时间与计时系统	22
2. 历法	26
3. 中国古代天文学简说	31
4. 西方星空文化	35
补充阅读	39
第三章 天文望远镜	47
1. 望远镜的原理和分类	47
2. 支架	53
3. 天文望远镜的配件	55
4. 挑选合适的器材	59
5. 双筒望远镜	61

补充阅读	66
第四章 太阳系	69
1. 太阳系概述	69
2. 太阳	70
3. 月球	73
4. 行星及卫星	75
5. 太阳系其他天体	92
第五章 特殊天象	96
1. 日食与月食	96
2. 彗星	98
3. 流星雨	100
4. 人造卫星	104
补充阅读	106
第六章 恒星	109
1. 恒星概论	109
2. 恒星演化	117
3. 恒星的结局	124
4. 特殊恒星	131
补充阅读	136
第七章 深空天体	150
1. 深空天体及其业余观测	150
2. 深空天体的编号及梅西耶天体	151
3. 星团	152
4. 星云	154
5. 星系	157
6. 宇宙	162
补充阅读	171
第八章 太空探索	172
1. 序言	172
2. 火箭及其他航天器	172

3. 人造地球卫星	178
4. 太阳系探测器	181
5. 载人航天	186
补充阅读	196
第九章 资源	201
1. 天文读物和观测指南	201
2. 星图	203
3. 杂志	204
4. 软件和手机 APP	204
5. 网络资源	205
6. 公众设施	206
7. 北京附近的观测地	207
第十章 青年天文学会简介	209
1. 基本情况	209
2. 活动介绍	209
3. 发展历程	211
插图目录	217

第一章 星空导览

天文爱好者们在与天文结缘时，首先接触到的就是我们头顶这片星空。按照从“看什么”到“怎么看”的思路，我们首先要回答：仰望星空时，我们都看见了什么？

① 夜空概述

在晴朗的夜空中，你都会看见些什么？

首先，你会看见黑色的背景，那是来自深邃宇宙的黑暗^①。在繁华的城市中，你看到的天空可能不够黑，这是因为地面上的灯火造成了一定程度的光污染（light pollution）。

其次，你有可能会看见明亮的月亮。之所以说是“可能”，是因为要考虑到月亮的相位。关于月亮的观测细节，我们会在后文介绍。

夜空的主角之一则是闪闪发亮的恒星（star）。恒星的亮度和在天空中的相对位置基本是固定的，它们组成了一些固定的形状，古人将这些形状联想成诸多星座，演绎了不少浪漫的星座神话。

夜空的另一大主角是太阳系的行星（planet）们，它们看起来与恒星最大的区别是“行”，即行星相对于恒星背景有着非常明显的位置变化。虽然行星自身不发光、只反射太阳光，但由于它们距离地球很近，金木水火土五颗行星在夜空中都是非常明亮的目标——也许你在傍晚的天空中看到的那个亮点，不是恒星，也不是 UFO，而是传说中的“长庚星”，金星。

在特定的时刻，我们还可以看到一些“天外来客”：比如流星（meteor），它们偶然出现，又转瞬即逝，往往给仰望的人们留下一声惊叹；比如彗星（comet），大彗星是非常罕见而又壮丽的天象。例如 2019 年 12 月，科学家们发现了一颗正在朝太阳系靠近的彗星，并将其命名为阿特拉斯彗星（Comet ATLAS）；然而令天文爱好者们失望的是，这颗彗星并没有如期划过夜空留下绚烂的尾迹，而是在太阳巨大的引力作用

^① 关于为什么夜晚的天空是黑的，有一个很有趣的“奥伯斯佯谬”（Olbers' paradox），感兴趣的朋友可以深入了解。

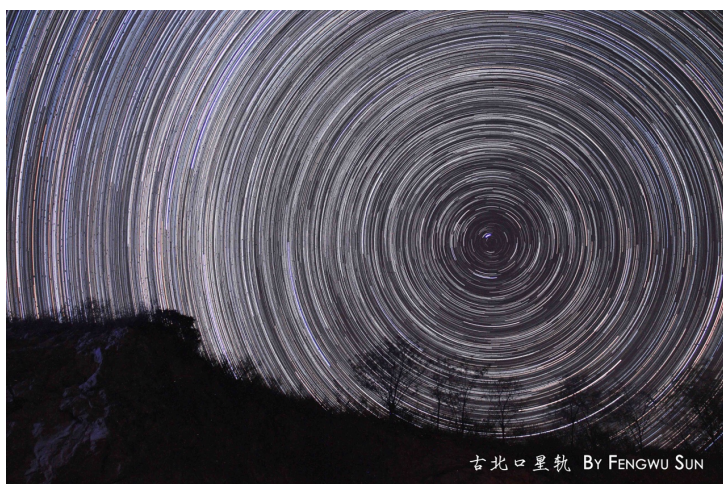


图 1.1 长时间曝光后得到的星空图像（星轨）。可以看出，夜空中的星星似乎都围绕着同一个点旋转，这就是所谓的“周日视运动”现象——这是因为地球自转引起了星星的东升西落。图片来源：青年天文学会

下分裂成了好几个小彗星。

除了流星、彗星外，我们可能还会看到许许多多在空中匀速而缓慢飞过的人造卫星（satellite），如国际空间站（ISS）与 2021 年开始建设的中国空间站^②；同时，飞机、鸟儿、风筝与孔明灯等也偶尔会来捣乱，不过只要你拥有了基本的观测经验，分辨出这些“UFO”并不是一件困难的事情。

在足够黑暗的夜空中，你还会在合适的时间看到一条浅浅的银河（Milky Way），这就是我们太阳所身处的星系——银河系。一般来说，夏季夜晚看到的银河最为明亮壮阔，但是由于城市中愈发严重的光污染，我们已经很难在北大校园中看到银河。

同时，天空中可能还有一些明亮的星团、星云、星系能被肉眼直接观察到，这些“深空天体”（deep sky object, DSO）的观测细节将在后文中介绍。

② 天球与星座

在认识恒星与星座之前，我们首先要了解什么是天球（celestial sphere）。也许这部分的难度比你想象得略高，但是了解天球能够帮助你深入了解星空，可以按照自己的想法进行观测实践，还可以让你学会使用天文观测的利器——天文望远镜（telescope）。

为什么要引入天球这个概念呢？因为我们需要描述天体的位置，以便于记录、研究与交流。“天似穹庐，笼盖四野”。我们通常看到的天体离我们都太远了，以至于

^② 中国空间站过境预测可见<https://heavens-above.com/PassSummary.aspx?satid=48274>。

在我们描述它们位置的时候，完全可以忽视距离（当作无穷远就好），而只考虑方向。这样，我们就可以认为所有的天体投影在以观测者为球心，半径无穷大的球面上，这就是天球。在天球上，我们需要用角度描述两个点之间的距离，这其中的道理应当不难理解。实际上，人们对天球的认识，也是数学中“球坐标系”这一概念的来源。

也许你仍然不熟悉天球的概念，但你一定熟知地球，我们可以将二者类比，以建立起来你对天球的理解：地球上有着诸多相对位置不变的城市，它们的海拔在地球仪上无关紧要；天球上也有着诸多相对位置不动的恒星（其实它们也在动，但是动得很慢，几乎无法察觉），它们与我们地球的距离在天球坐标系中同样无关紧要。在这一类比中，天球上的恒星就对应于地球上的城市。

天轴、天极与天赤道 为了在天球上建立球面坐标系，我们可以自然地设定天轴、天极与天赤道。在高中地理中我们知道，地球的自转轴（即地轴）在空间中的指向是固定的^③；因而，我们可以自然地将**天轴**设为与地轴平行，其与天球的两个交点就自然地被称为**南天极**、**北天极**，而地球上的赤道在天球上的投影就被称为**天赤道**。

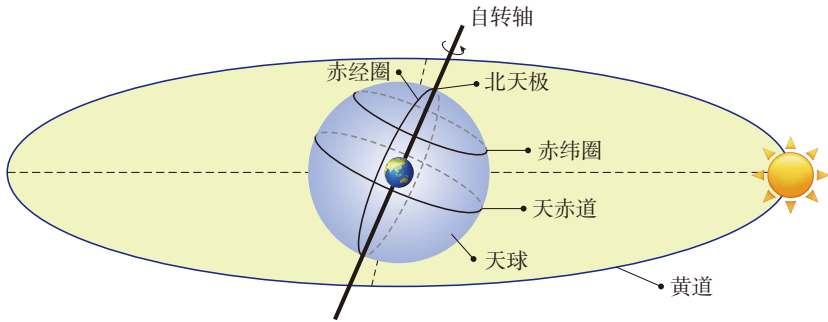


图 1.2 天球与地球

坐标表示 地理学家在地球上设定了地轴与赤道，从而建立了经线与纬线的概念（你可以轻易在地球仪上找到），此时地球上任意一点的位置就可以用经度、纬度两个坐标来描述。在天球上，我们将纬度称为**赤纬**（declination），记作 δ ，自南向北度量为正，范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ ；将经度称为**赤经**（right ascension），记作 α ，自西向东度量为正，单位为时分秒（用 $^h m^s$ 表示， 1^h 等于 15° ），范围为 0^h 至 24^h 。

赤道坐标系 在记录恒星位置的星图（相当于天上的地图）中，你可以根据恒星的赤经赤纬坐标来确定恒星的位置。这种描述恒星位置的坐标系称为**赤道坐标系**，其

^③ 实际上地轴有一个周期约两万六千年的摆动，称为地轴的进动（axial precession），这造成了岁差现象；但这个周期比起人的寿命而言显然长了太多。

基本大圆④就是天赤道，而坐标系的基本点是春分点⑤。利用赤道坐标系可以表示天空中所有天体的位置，比如著名的织女星（Vega）赤经为 $18^{\text{h}}37^{\text{m}}$ ，赤纬为 $38^{\circ}47'$ 。

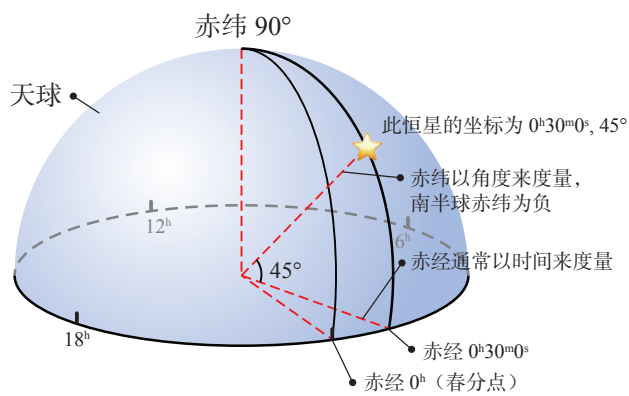


图 1.3 赤道坐标系的坐标表示

有了天球的初步概念之后，我们先来了解**星座**（constellation）划分的问题。可能很多同学认识星空都是从占星学（astrology）开始的，或许不少人都可以背出“十二星座”的顺序：白羊、金牛、双子、巨蟹、狮子、处女、天秤、天蝎、射手、摩羯、水瓶、双鱼。因此，当很多初次接触天文（astronomy）的同学被问起“天空中有多个星座”这个问题的时候，不少人的回答都是 12 个，但是正确的回答是 88 个。

星座的历史起源 古时的人们仰望星空，给星星连连线，欢乐地发现这个形状像个熊，那个像个狮子（当然实际上大部分并不是很像）。人们用线条连接亮星形成各种图形，在图形的基础上把星空划分成若干恒星的组合，每个组合就叫做一个星座，它们大小、形状不一，分别以图形近似的动物、器物等命名。很多星座的命名来源于神话故事，比如英仙座（Perseus）象征的是希腊神话中的英雄珀尔修斯，英仙座中著名的大陵五（Algol）被看做是美杜莎的眼睛。

现代天文学中的星座 恒星被划分入同一个星座，是由于它们在天空中位于较为一致的方向上，也就是说在天球上的投影比较接近。严谨地说，星座是天球上的一个区域，同一星座中的恒星与地球的距离可以大不相同。它们实际上可能相距很远，没有任何物理联系。一个星座里不只有你能看到的恒星，可能还有很多你看不见的天体，比如诸多星云和星系。

当然，由于各地民族文化的不同，全世界出现了各不相同的星座划分方式：我国古代有“三垣四象二十八宿”的天区划分，人们在夜空中勾画出了天上的宫殿。在西

④ 球面上的“大圆”，指的是球面上圆心与球心重合的圆（比如各种经线圈），纬线中只有赤道是大圆。在球坐标系中，与轴垂直的大圆就是基本大圆。
⑤ “基本点”的含义是，这一点的坐标可以写作 (0, 0)。春分点指的是黄道与天赤道的升交点；如果你不能理解这个概念，可以接着往下看，第 5 页有关于黄道的解释。

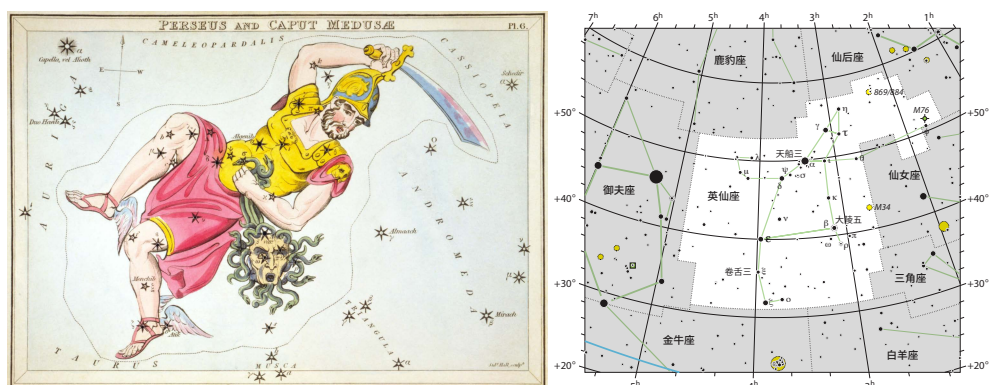


图 1.4 英仙座的神话想象图和实际的星图，读者觉得古希腊人的脑洞如何？图片来源：Wikipedia

方古代，星座划分起源于古巴比伦；后来，托勒密（Ptolemaeus）编制出了 48 个星座并对它们命名。希腊处于北半球，因此永远无法看到南天的一些星座（这一现象我们会在本章的最后进行解释）。后来，随着欧洲人到达南半球，星座方面的知识也得到了补充，直到 1928 年，国际天文学联合会（IAU）正式划分并公布了目前国际通用的 88 个星座分区方案。

恒星们离地球实在太远了，以至于地球随太阳在银河系内的运动对于我们看到的星空产生不了多大的影响，恒星自己的运动也不会有什么影响。所以在短时间内，星座图案不会有很大变化。但是时间长了，星座形状可能会发生显著变化。北斗七星现在看起来像个勺子，十万年之前和十万年之后它们长得就不是如今这个样子^⑥。

那十二星座是怎么回事呢？大约在两千多年前，古希腊天文学家为了标识太阳在天球上的位置，就把黄道^⑦分成了十二等份，每一部分称为一个“星宫”。为了给这些星宫命名，一个简便的办法就是寻找那一个星宫的位置对应的星座的名字。就这样，十二星宫就被命名为白羊、金牛、双子、巨蟹、狮子、室女（处女）、天秤、天蝎、人马（射手）、摩羯、宝瓶（水瓶）、双鱼。平常说的“XX 是 YY 座”，就是指，在 XX 出生那天，太阳的位置在 YY 星宫。

然而，由于岁差的原因（就是我们之前提到的那个周期为两万六千年的地轴摆动），21 世纪的星座位置已经与托勒密时的星宫对应不上了。比如当今天的太阳运行到白羊座时，按占星学的划分，太阳在大部分时间已经位于金牛宫；而当今天的太阳运行到金牛座时，太阳在大部分时间已经位于双子宫。并且，黄道经过的天区其实有 13 个星座，“后加入的”蛇夫座甚至比天蝎座占据的黄道位置更多。

⑥ 有兴趣的读者可以查看 Wikipedia 中这幅关于北斗七星前后十五万年内位置与形状变化的 3D 动图：https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Astro_4D_uma_rg_anim.gif。

⑦ 简单地说，由于地球绕太阳公转，导致太阳在天球上相对于背景恒星的位置有周期为 1 年的变化——这样，太阳在天球上的运行轨迹就被称为“黄道”，其物理本质是地球公转平面（黄道面）与天球的交线。

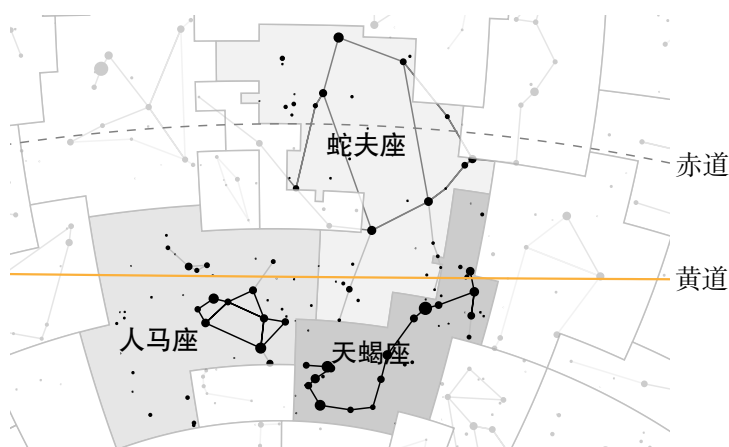


图 1.5 黄道经过蛇夫座、人马座和天蝎座示意图

需要指出的是，作为天文爱好者，我们旗帜鲜明地认为，占星学缺少任何可信的证据，利用十二星宫的概念对人进行归类与占卜也是有偏见色彩和荒谬的^⑧。总之，对于是否相信占星学的结论，希望读者能有一个自己的判断。

③ 恒星的命名与亮度

为了辨认和交流的方便，人们给很多恒星起了名字，这一节里我们首先会提到恒星的命名方法。天文爱好者们常用的恒星命名法有以下四种：

1. 西方习惯命名 恒星的命名首先是习惯的命名方法，很多明亮的恒星都有不少惯称：比如夜空中最明亮的恒星 Sirius（天狼星），比如 Vega（织女星）。这种命名方法是非常原始的（不少名字甚至起源于三千年之前的古巴比伦），但在国际上仍然很常用，在一些纸质星图的附录中，你可以找到天空中主要恒星的习惯命名。这种命名方法常用于自动寻星望远镜的数据库和国外天文爱好者交流。

2. 中国古代命名 中国古星官（其实西方的星座也类似）就像是天空中每家每户的门牌号码，我们可以给住在这里的各人编号。门牌号 + 编号，就得到了每颗恒星的名称。在中国古代命名中，门牌号一般是星官，而编号一般是数字：比如，河鼓二、毕宿五，这其中数字的顺序一般来自位置排序。另外少数一些恒星有自己的别称：比如北斗七星，可以称之为北斗一、北斗二，直到北斗七，也可以被称为天枢、天璇、天玑、天权、玉衡、开阳、摇光。这种命名方法常用于中国国内天文爱好者的交流。

3. 拜耳命名法（※） 德国天文学家拜耳（Bayer）在其 1603 年的巨著《测天图》中提出了这种目前国际通用的命名法，这种命名法也是“门牌号 + 编号”模式。在

^⑧ 这是一篇果壳网上的文章——《天文学家如何看待占星术》：<http://www.guokr.com/article/438486/>。

经常使用的简写模式下，这里的“门牌号”是星座的拉丁缩写，比如处女座（Virgo）的缩写是 Vir，金牛座（Taurus）的缩写是 Tau；而“编号”常用希腊字母表示，例如，北极星被记作 α UMi（小熊座 α ），我们之前提到的大陵五被记作 β Per（英仙座 β ）。当 24 个希腊字母不够用的时候再使用小写和大写的拉丁字母。好在拜耳命名法一般是按照亮度排序的^⑨，不用希腊字母表示的恒星普遍很暗。拜耳命名法的用途最为广泛，如星图表示等。

4. 弗兰斯蒂德命名法 英国第一任皇家天文学家弗兰斯蒂德（Flamsteed）发明了一套与拜耳命名法类似的恒星命名法，仍然采用了“门牌号 + 编号”模式，只是编号变成了数字，而数字的顺序在编纂时根据赤经大小决定：比如，狮子座最亮星轩辕十四记作 32 Leo。这种命名法虽然在 18 世纪广为使用（现在也有不少地方仍然在用），但是仍有不小的局限性——南天的许多星座没有被弗兰斯蒂德整理过，因而它们里的恒星没有弗氏名；几百年来，恒星的位置也发生了微小变化，原来的赤经顺序已经被打乱了；尽管全天有三千余颗恒星有弗氏名，但这个数量对现在的天文学研究已经远远不够了。这种方法常用于星图表示等；在天文爱好者中，不如拜耳命名法常用。

在现代天文学中，由于观测技术的进步和科学研究的需要，天文学家们有更为详细的恒星列表，因而衍生出了很多种命名方法，在这里我们不过多详述，有兴趣的读者可以查阅 https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_designation。

我们再来谈谈恒星（乃至其他天体）的亮度。古希腊天文学家喜帕恰斯（Hipparchus）把恒星分为 6 等，一等星最亮，六等星最暗——显然这样的划分越来越不够用。后来人们发现，一等星和六等星之间的亮度相差约 100 倍，这样的话天文学家干脆就规定星等每相差 1 等，亮度相差 $\sqrt[5]{100}$ 倍，即约 2.512 倍。于是星等演变成了一种连续的量度，可以是负值，可以带小数。

按照现代天文学的测量，太阳视星等为 -26.7 等，满月的视星等约为 -13 等，金星约为 -4 等，夜空中最亮的恒星为 -1.4 等的天狼星，织女星为 0 等，北极星是 2 等，在条件极好的时候，正常人眼能看到的最暗星是 6.5 等；而利用 50 mm 口径的双筒望远镜，你最多可以看到 $10 \sim 11$ 等的恒星。

但是恒星的视亮度（亮度）不代表它的真实亮度（光度），亮度显然跟距离有关。为了表示恒星的光度，绝对星等的概念诞生了。假设把天体放在距我们 10 秒差距^⑩（32.6 光年）远的地方，此时它的亮度（视星等）就是它的绝对星等。

在地球上，太阳的视星等是 -26.7 等，天狼星是 -1.46 等；但天狼星的绝对

^⑨ 这种排序规则有不少例外情况，比如猎户座 α （参宿四， α Ori）其实是比 β （参宿七）暗的（这有可能是古人观测不准确，也有可能是星的亮度有所改变）；有一些星座甚至没有 α 星，比如小狮座（Leo Minor）。

^⑩ 秒差距的含义可以参考 <http://baike.baidu.com/view/7924.htm>，实际上你只需要知道秒差距和光年都是距离单位而不是时间单位就好，并且 1 秒差距对应着约 3.26 光年。

星等是 1.43 等，而太阳是 4.8 等——显然，天狼星实际上是比太阳亮不少的。

④ 太阳系天体

在我们已经对恒星以及天球、星座有一个初步的认识之后，让我们把目光回到太阳系——人类在浩瀚宇宙中唯一的家园。如图 1.6 所示，太阳系共有八大行星，从里到外依次是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星。除此之外，还有许多矮行星、小行星、彗星等小天体。



图 1.6 太阳系示意图。本图并没有按真实比例绘制。图片来源：Wikipedia

太阳是太阳系唯一的恒星，是绝对的主宰者。在太阳内部，氢原子在高温高压下发生核聚变，产生能量，发光发热，是地球生命赖以生存的能量源泉。太阳大气层上的太阳黑子、日珥、米粒组织等是业余太阳观测的主要兴趣点。要注意的是，**切不可用肉眼直接观测太阳，必须使用巴德膜等减光装置，否则可能会导致失明的严重后果！**

八大行星中，天王星、海王星用肉眼一般是看不见的。水星因为距离太阳太近，总是淹没在阳光中，也较难被看见。金、木、火、土四颗行星则很容易被看到。它们一般比恒星要亮，用小型的望远镜即可看到金星的圆缺变化、木星的卫星和土星的光环，而在大型望远镜中，行星表面的细节更会让你发出惊叹。

月球是地球的卫星。“人有悲欢离合，月有阴晴圆缺”，月亮的圆缺变化引起了人间多少思绪缠绵，但月光却又是天文观测的大敌。月相的变化，取决于我们看月球的角度。如图 1.7 所示，月球始终有一半会被太阳照亮，只不过这半个亮面能被地球上的观测者看到多少，取决于月球的位置。

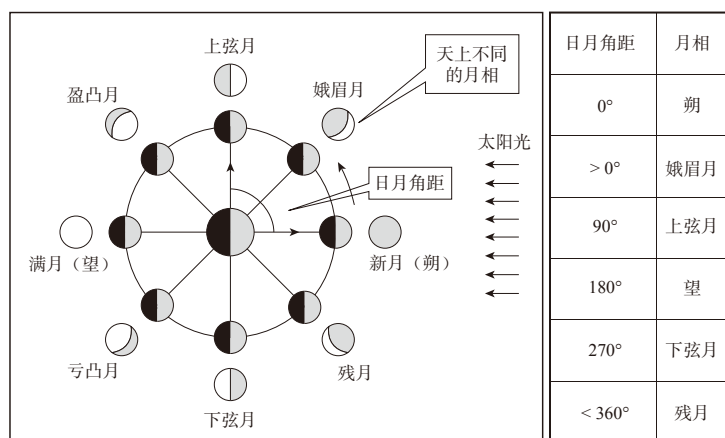


图 1.7 月相示意图

当月球位于地球与太阳之间时，亮面背对地球，我们看不见月球，这个位置称为“新月”。理解了新月是怎么一回事，就不难理解月相了。在新月之后，月球逆时针公转，先后经历图中以下位置：新月 → 娥眉月 → 上弦月 → 盈凸月 → 满月 → 亏凸月 → 下弦月 → 残月 → 新月。当月球再次绕到地球和太阳之间时，又变为新月，下一轮周期就开始了。这里请注意，在北半球看，前半周期的月球是右边亮，后半周期是左边亮——这样就可以辨别上弦月和下弦月了。

新月又叫“朔”，满月又叫“望”。一个朔望周期被称为朔望月，长度约为 29.53 天，这与农历一个月的平均长度相同。

月相也被用于制定一些历法。中国的农历规定新月所在的那一日（即朔日）为每个农历月的第一天。月相对于天文观测也有着重要的参考意义。首先，满月前后的月球过于明亮（满月视星等约 -13 等），月明则星稀，干扰观测，因而观测活动往往选在新月前后进行；其次，在观测月球的时候，尽量选在上、下弦附月近，这与摄影中“侧光”的概念类似——此时的月球立体感较强，容易看清其表面的环形山等地貌结构，而满月的时候则是“顺光”了，月面立体感不足。

此外，太阳系天体还会发生日月食、流星雨等特殊天象。对这些特殊天象的介绍，以及对太阳、月亮、行星和太阳系小天体的进一步介绍，请读者阅读本书第四章《太阳系》和第五章《特殊天象》。

5 如何观星

在对天球、星座、恒星有一个初步的认识之后，我们就可以利用刚刚学到的知识，投入到观测实践当中——这样，你才可以告别心血来潮的惊鸿一瞥，而是像一个天文

爱好者一样审视头顶这片美丽的星空。不过，在开始一场观测前，我们仍需要回答最后一个问题：观测需要哪些条件？

观测的条件，无外乎“天时”“地利”“人和”三点。我们先谈天时：

1. 首先，你需要一个晴朗的夜晚。这可以说是进行一场观测的先决条件——如果阴天下雨，显然看不到星星。北大青天会在业余天文圈中经常被戏称为“阴天教”，主要原因就是我们的各种观测活动“经常”遇到阴天。^⑪

北京的晴天相对不少，但影响我们观测的还有华北平原厚重深沉的霾。当霾出现时，只有等大风到来，才能使大气透明度满足观测的要求。一般来说，高海拔地区相对受影响较小，在京郊的山上观测，可以一定程度地避开霾的影响。

2. 其次，你要注意一下月相。大家都懂得“月明星稀”的道理——当深蓝的天空中挂着一轮金黄的圆月，地面上甚至能看见自己的影子，你还能观测到多暗的天体呢？前文已经提到，除非是专门观测月亮，否则一般观测要选择月亮不可见的时段，也就是每月农历的初一前后；相反，农历十五满月前后不适合观测。

说完了天时，再来说说地利。选择观测地点，首先观测地点的天气状况要良好，此外还要考虑以下几个因素：

3. 尽量远离光污染。要减少光污染，一般只能尽可能远离城市；即便是避不开城市，也要尽量避开一切可能直射的灯光。北京高校天文社团常去的华海田园和喇叭沟门等地都位于京郊，离市中心比较远，因此观测条件比较好，很容易就能看到银河。

一般来说湿度降低、海拔升高可以提高大气透明度。所以总体上北方的观测条件要优于南方。当然，除去对观测的影响外，观测地点的**安全问题、交通问题与地势**也是必须考虑的。更严肃的观测还要考虑到观测地的视宁度（seeing）^⑫等其他因素，在此我们不做过多阐述。在第九章《资源》中，我们列出了一些北京附近的观测地，方便读者选址。

观测的主体毕竟是人，当你选择好了观测的时间和地点后，剩下的条件就是“人和”了：

4. 选择舒服的姿势 一般来说找到东西南北之后（天文观测中，面朝南边后是左东右西），就可以好好地观星了。目视观星的最佳观测姿势是仰卧，可以将肉眼观测视野广阔的优势发挥到极致——你可以在防潮垫或者躺椅上观测，手持双筒望远镜也是如此。

5. 适应黑暗，遵守礼仪。你的眼睛需要一段时间适应黑暗（处于黑暗中 15 分钟至半个小时），这样才能让你看到更多的星星——在这个时间段，不要接触任何光源，

^⑪ 在 <https://www.meteoblue.com> 网站可以查看非常详细的天气情况，<https://www.windy.com> 则提供了一种更为直观的展示形式。

^⑫ 简单地说，视宁度所表示的就是大气抖动剧烈程度，视宁度越好，大气越“宁静”，抖动得越小，这样天体在望远镜中成像越稳定，你就可能会看到更多的天体细节。

即便是亮度调到最低的手机屏幕也会毁了你的努力。因此保持观测时的黑暗状态和不要打扰到别人的观测是观测时必须要注意的——这也就是爱好者们常讲的**观测礼仪**^⑬。你至少应该遵循以下观星礼仪：

- 避免强光，不要用白光手电筒、闪光灯照明，照明光源首选红光；
- 行走时注意脚下，千万不要碰到自己或他人的望远镜、相机；
- 尽量不要在他人的相机前经过，更不要停留，除非确认没有在拍摄；
- 谨慎并尽可能少地使用指星笔。

6. 保暖，保暖，保暖！后勤方面也有许多值得注意的地方，彻夜在外最重要的就是保暖，在秋冬春三季北京郊区的山上观测，你永远不会觉得温暖。可以使用睡袋、地席等防寒设备，带好足够的御寒衣物以及食物（即使是夏季）。

另外，观测前与观测时不要饮用含酒精和咖啡因的饮品，可能对视力有影响。观测前后，还要注意休息，不要因为过于疲乏而影响观测或工作学习。

⑥ 如何阅读星图

对于从未接触过天文的人来说，从星图开始学习是最方便不过的，下面四页列出的是北纬 25° 至北纬 45° 间的全天星图。星图可以很好地指导观测——在闲暇的时候拿着星图，到一个视野开阔而远离光污染的地方，对照着星图和夜空，逐步认出星图中明亮的恒星和星座（在星图里，亮星的半径会更大一些），进而熟悉最基本的裸眼星空。熟悉全天的星空可能需要一年的时间，不过即便每次只抽出半小时的时间，每月一两次，日积月累，也会有所收获。

那么，该如何阅读星图呢？首先我们要注意，星图不同于地图。地图的方位是“上北下南，左西右东”；而星图则是“上北下南，左东右西”，这是因为使用星图时需仰卧在地上，从下往上看。这样方位自然就是上北下南，左东右西了。

现在，我们可以来探索一下四季星空，也就是要详细回答“看什么”这个问题了。由于地球绕太阳公转，我们在一年四季看到的夜空，显然是有区别的——天空中离太阳较近的区域难以观察，而在太阳对侧的天空，在夜晚能被更好地观察，这也就产生了四季不同的星空。在**第 7 节**，我们还会进一步讨论这个问题。

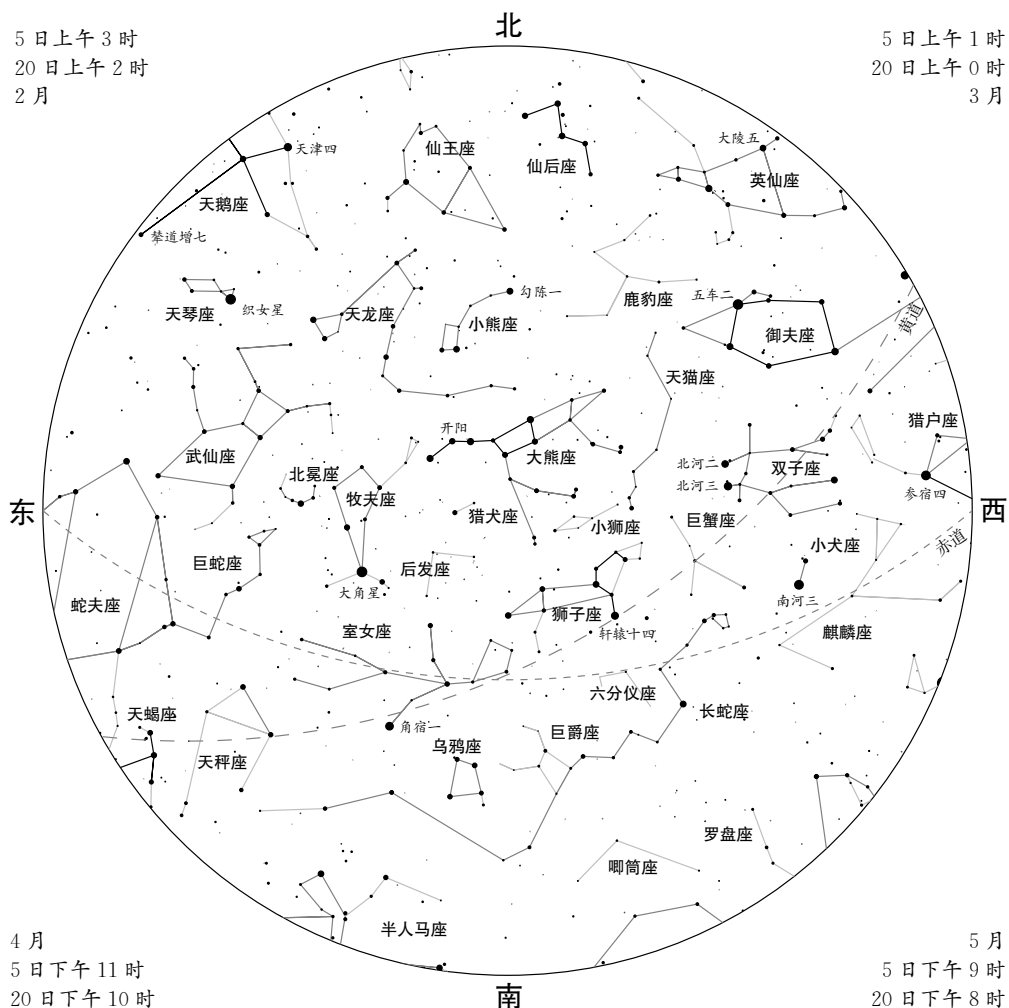
在接下来的四页中，我们为读者引用了**四季星空图**，读者可以根据观测的日期和时刻选择合适的星图，指导自己的观测。我们建议您在闲暇的时候，拿着星图，到一个视野开阔而远离光污染的地方，对照着星图和夜空，逐步认出星图中明亮的恒星和星座（在星图里，亮星的半径会更大一些），进而熟悉最基本的裸眼星空。熟悉全天

^⑬ 强烈建议每位读者都阅读未名 BBS 天文版中的这篇文章：《观测礼仪 [转自人人]》。这里的很多内容都值得大家学习：<https://bbs.pku.edu.cn/v2/post-read-single.php?bid=896&type=0&postid=14241631>。

的星空可能需要一段时间，不过即便你每次只抽出半小时的时间，每月一两次，日积月累，也会有所收获。总有一天你会发现，漫天的星斗，都是你最熟悉不过的老朋友。晚上下课后，多抬头看看夜空也是非常美好的事情吧。

观察星空时，除了给恒星连线认星座，你还可以仔细观察众恒星的颜色，可以寻找在天空中“多出来”的行星。需要注意的是，在观测者处于不同纬度时，观察到的星空有一些差异，下面四页的星空图展示的是在北纬 40° 观察到的四季星空。

春季星空图

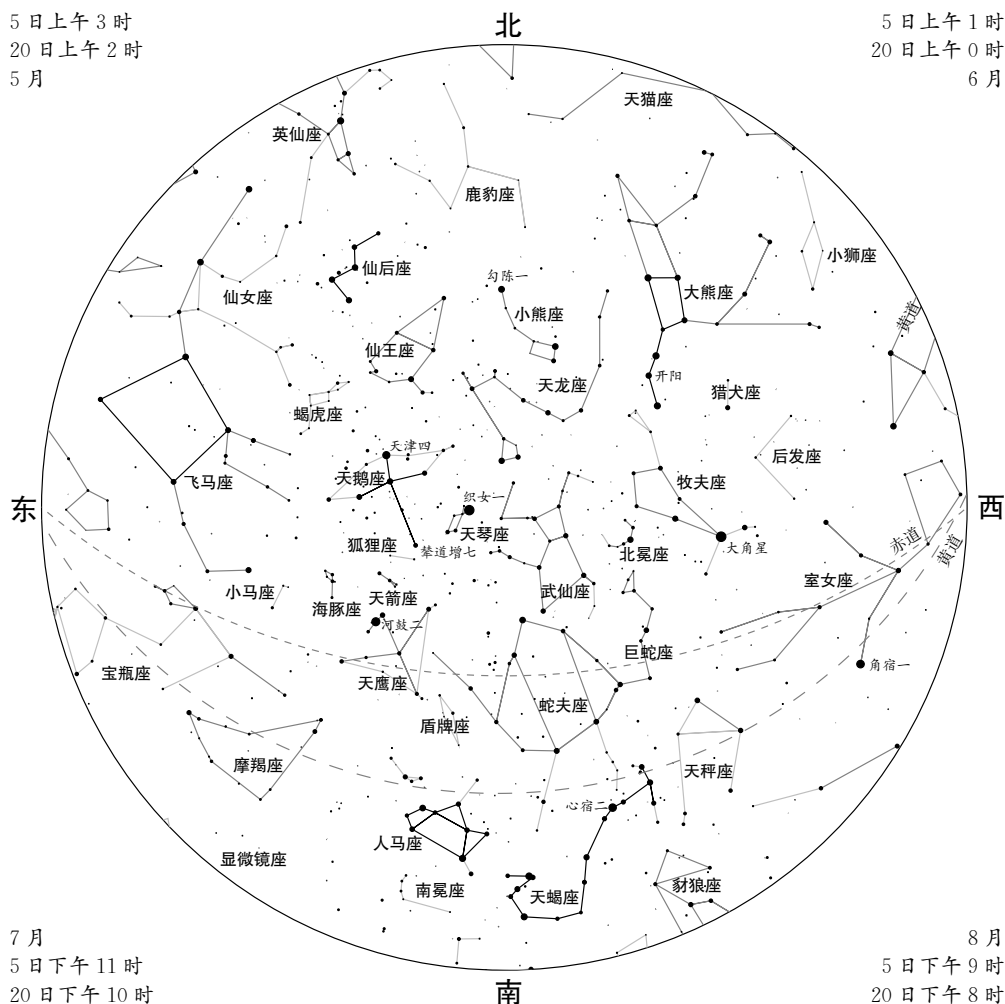


春季星空最引人注目的是高悬于北方夜空的北斗七星：北斗一、北斗二直到北斗七，或称为天枢、天璇、天玑、天权、玉衡、开阳和摇光。除了天权，其他六颗星都是2等星，即使在有灯光的城市也很容易被找到。北斗七星不是一个完整的星座，而是大熊座最亮的一部分。它们就像“路标”，能够帮助我们找到春季星空几乎所有的主要恒星和星座。连接斗口的天璇和天枢，并延长五倍的距离，就会找到北极星（小熊座 α ）。沿着斗口另外两颗星（天权、天玑）向西南方向寻去，可以找到1等亮星轩辕十四，它是狮子座的 α 星。顺着斗柄的几颗星组成的弧线，你可以找到橙红色的0等星——大角星（牧夫座 α ），它也是春季星空最亮的一颗星。沿着这条弧线继续延长，又可找到另一颗1等亮星角宿一（室女座 α ）。再继续向西南寻去，可找到由4颗小星组成的四边形，就是乌鸦座。这条弧线被称为“春季大弧线”。由大角、角宿一和狮子座的另一颗亮星五帝座一（狮子座 β ）组成的三角形被称为“春季大三角”。

夏季星空图

5 日上午 3 时
20 日上午 2 时
5 月

5 日上午 1 时
20 日上午 0 时
6 月

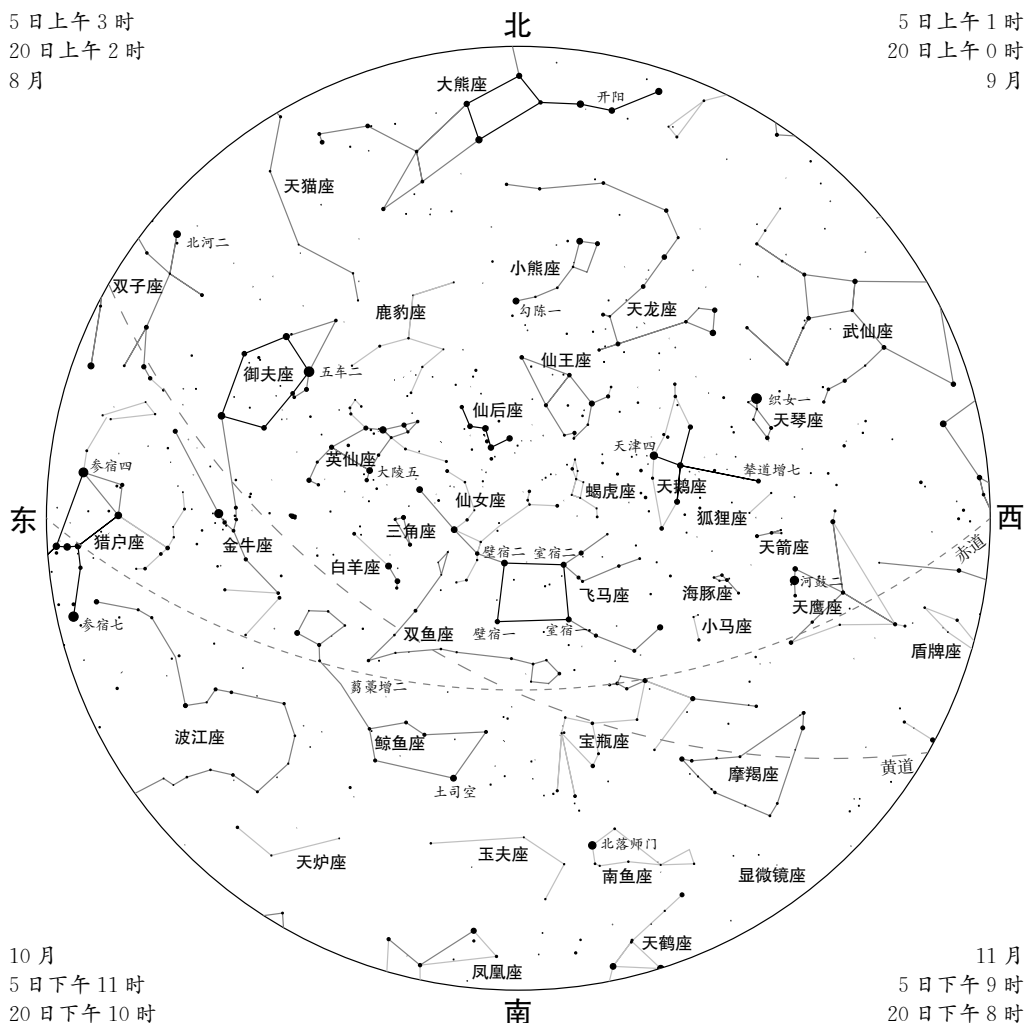


夏季星空的标志是从北偏东地平线向南方地平线延伸的云雾般的光带——银河和由3颗亮星，即银河两岸的织女星（天琴座 α ）、牛郎星（天鹰座 α ）和银河之中的天津四（天鵝座 α ）所构成的“夏季大三角”。夏季银河极为壮美，但只能在光污染较轻的野外才能欣赏到。由织女星顺着银河岸边向南方巡去，可看到一颗红色的1等亮星心宿二（天蝎座 α ），它和十几颗星组成“S”形曲线，就是夏季的代表星座——天蝎座，蝎尾浸没于银河的浓密部分之中。由牛郎星沿银河南下，可找到人马座，其中的6颗星组成南斗六星，与西北天空的北斗七星遥遥相对。人马座部分的银河最为宽阔和明亮，因为这是银河系中心的方向。由织女星向牛郎连线并继续向东南方向延伸，可找到由暗星组成的摩羯座。沿天津四与织女星的连线向西南方向巡去，可找到武仙座。武仙座以西，有7颗星小围成半圆形，这就是美丽的北冕座。

秋季星空图

5 日上午 3 时
20 日上午 2 时
8 月

5 日上午 1 时
20 日上午 0 时
9 月

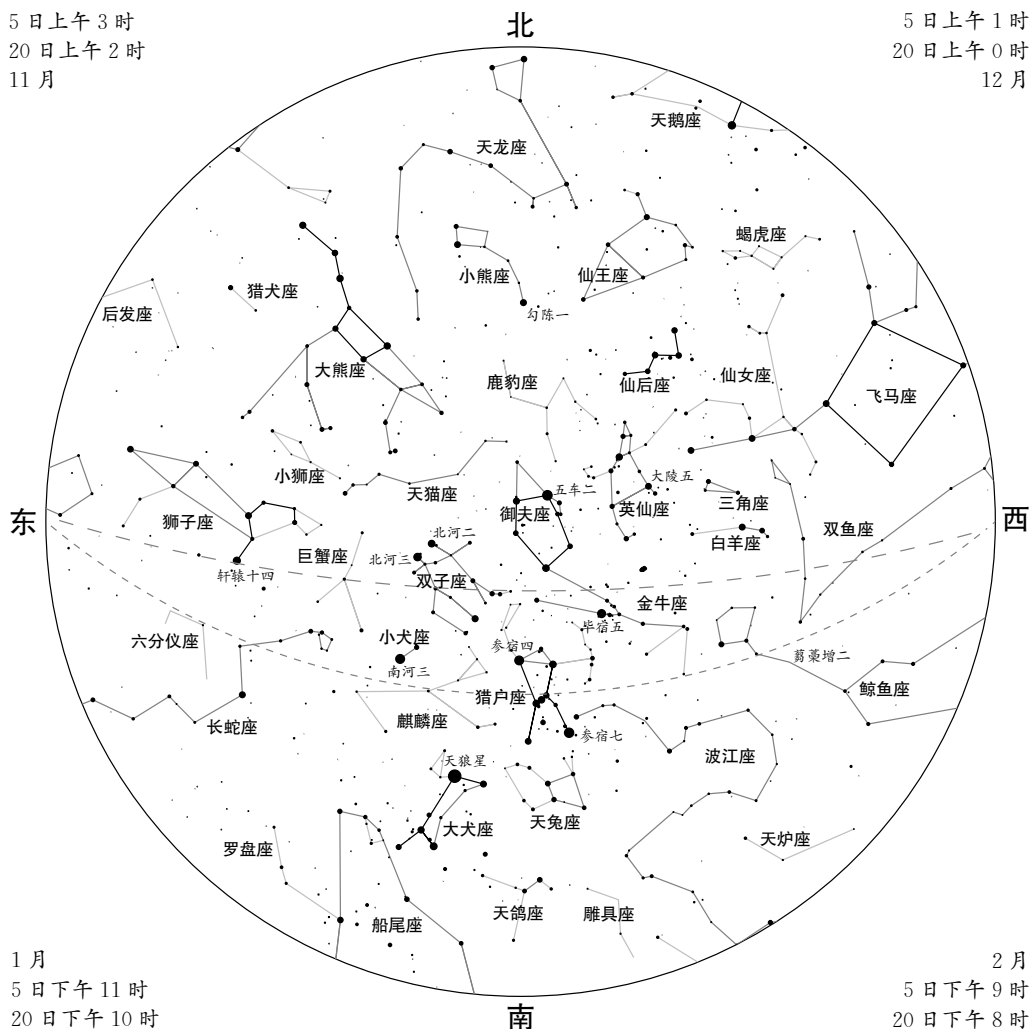


飞马当空，银河斜挂，是秋季星空的特征。巡视秋季星空，可从头顶方向的“秋季四边形”开始，它由飞马座的室宿一（ α ）、室宿二（ β ）、壁宿一（ γ ）和仙女座的壁宿二（仙女座 α ）构成，除壁宿一为3等星外，其余皆为2等星，因而十分醒目。由壁宿一向壁宿二延伸，经由仙后座的王良一（仙后座 β ）可找到北极星。沿此基线向南延伸，可找到土司空（鲸鱼座 β ）。这条长长的南北线差不多在赤经 0^h 的位置，记住它，估算星星的位置就很方便。由室宿二向室宿一延伸，在南方低空可找到秋季星空唯一的1等星北落师门（南鱼座 α ），由室宿一向室宿二延伸，可找到仙王座。从秋季四边形沿仙女座向东北方向延伸，可找到由3列星组成的英仙座。秋季四边形的东南面是双鱼座和很大的鲸鱼座，目前春分点位于双鱼座。仙王、仙后、仙女、英仙、飞马和鲸鱼诸星座构成王族星座，是秋季星空的主要星座。秋季四边形的西南面是宝瓶座和摩羯座。秋季星空亮星很少，但像仙女座大星云M31这样的深空天体却比比皆是。

冬季星空图

5 日上午 3 时
20 日上午 2 时
11 月

5 日上午 1 时
20 日上午 0 时
12 月



在一年四季之中，冬季星空最为壮丽。最引人注目的当然是高悬于南天的猎户座：夹在红色1等亮星参宿四（猎户座 α ）和白色1等亮星参宿七（猎户座 β ）之间的三颗星参宿一、参宿二、参宿三（猎户座 ζ 、 ϵ 、 δ ）颇为吸引人。顺着猎户三星向南偏东寻去，可找到夜空最亮的恒星天狼星（大犬座 α ）。参宿四的正东另有一颗1等亮星南河三（小犬座 α ）。参宿四、天狼星和南河三组成“冬季大三角”，淡淡银河从中穿过，这部分银河是全天最暗淡的。沿猎户座三星向西北望去，可找到一颗红色1等亮星毕宿五（金牛座 α ）以及附近的几颗小星，它们组成毕星团；再继续向西北寻去，可看到由6~7颗小星组成的昴星团。它们皆属金牛座。金牛座的东北是五边形的御夫座，其中标志性的亮星五车二（御夫座 α ）也是1等星。顺着参宿七和参宿四的连线向东北望去，可找到两颗亮星，它们是1等星北河三（双子座 β ）和2等星北河二（双子座 α ）。把五车二、北河三、南河三、天狼星、参宿七、毕宿五连接起来，就组成了“冬季六边形”。

7 天体的方位与度量

在观测的时候如何确定天体的具体方位呢？这个问题很重要，它本质上是一个数学问题，由于文章性质的限制，我们不会在这里过多谈论具体的运算方法——现在很多软件都可以模拟计算出不同时刻下的星空了，比如著名的 Stellarium，具体信息你可以在第九章《资源》中了解到。下面，我们来初步讨论几种天球坐标系，以讨论天体的方位与度量。

我们首先要回到一个很久没有提及的概念：天球。还记得天球的概念吗？天球是以观测者为球心，半径无穷大的球面。在那时，我们提到了一个叫做“赤道坐标系”的概念；在我们实际的观测之中，最直观的天球显然不是按照赤道坐标系来的，而是地平坐标系。

地平坐标系

我们站在地上，很明显地就会感觉，天空就像一个半球一样扣在大地上，这也就是地平坐标系最基本的感受来源。地平坐标系的基本大圆是地平圈，也就是我们常说的地平线；而基点一般是北点。

这样，我们就可以通过描述天体的地平高度角 h 和方位角 A ，表示天体的位置。高度角 h 从地平圈起算，向上为正，向下为负，范围从 -90° 到 90° ；而方位角 A 从北点 N 起算，正北为 0° ，顺时针测量，正东为 90° ，以此类推，范围从 0° 到 360° 。另外，在特定的情形下，也常用天顶距 z 来代替 h ，同一天体的天顶距和地平高度之和显然是 90° 。

地平坐标系最大的好处是直观，它符合人们的一般感受。你在日常生活中描述方位时，以及你使用手持的双筒望远镜进行观测时，使用的都是地平坐标系。这一坐标系的缺点是，同一天体的地平坐标，与观测的时间地点皆有关——也就是说，在天体东升西落的过程中，它的高度与方位角时时都在变化；这样实际上是不利于长时间记录一个天体的信息的——需要同时调整方位角和高度角，才能跟踪天体的运动。

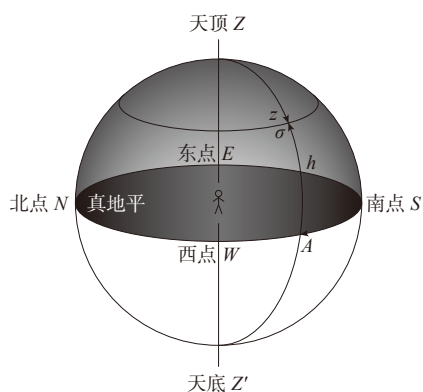


图 1.8 地平坐标系

地平坐标系与赤道坐标系的关系

如果你真的在户外看过北极星，你应当发现，位于北天极附近的北极星确实在正北，但是它却不在天顶——你有没有想过这个问题？如图 1.9 所示，由于你并不处于

北极，所以你看到的北极星（北天极）就不可能处于你的头顶。假设你在 O' 点观测，地理纬度为 $\angle O'OQ'$ ；在地球上任何一点看去，北天极的方向应该是相同的（这是因为北天极是天球上的一个点，而天球半径无限大，地球半径有限）——那么你此时看到的北天极高度 $\angle P'O'E'$ 应该和你的地理纬度一致！

请读者牢记这个结论：**北天极高度等于观测地纬度**。这个结论可能在高中地理课中涉及到过，但是在这里，它非常重要。有了这个结论，你就可以把赤道坐标系和地平坐标系结合在一起了。

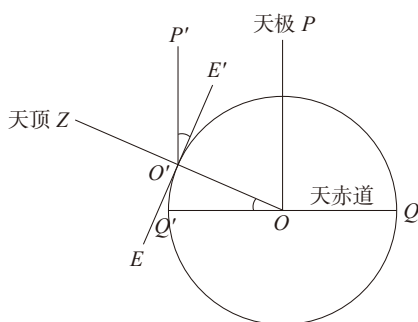


图 1.9 北天极高度与地理纬度的关系

天体的周日视运动

了解了地平坐标系和赤道坐标系，现在请看图 1.10。地平面把天球切成了两半，上半球面就是你能看见的天空，北天极和地平线的夹角是你当地的纬度。地球绕地轴自转，而地球上的观测者感觉不到地球自转，只会感觉到天球绕着天轴慢慢旋转，从而每颗恒星都绕着天极慢慢旋转，约 23 小时 56 分 4 秒转一圈^⑭。这一周期等于地球自转周期。这种运动叫做天体的周日视运动。

天体的赤道坐标（赤经 α 、赤纬 δ ）是与观测的时间和地点无关的^⑮；但由于天体的周日视运动，天体的高度和方位角，就会随着时间不断变化。说白了，这就是我们常讲的“东升西落”。

所有天体都东升西落吗？对于我们北半球中纬度地区而言，答案是否定的。请看图中用箭头标识出来的三个纬线圈，它们有如下特征：

- 最北边纬线圈上的天体永不落下；
- 最南边纬线圈上的天体永不升起；
- 而中间纬线圈上的天体从东北升起，从西北方向落下，在地平线上的时间要比在地平线下去要长。

只有天赤道上的天体，才是真正的“东”升、“西”落，在地平线上的时间等于在地平线下的时间——这也就是为什么春分秋分之时，南北半球都是昼夜等长的：因为只有在春分秋分时，太阳才恰好位于天赤道上。图 1.11 分别表示北极、赤道和中

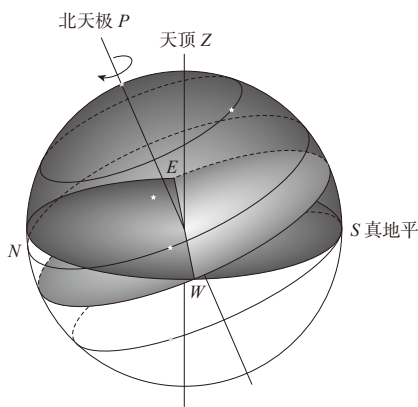


图 1.10 地平 - 赤道坐标系。图片来源：《基础天文学》

^⑭ 这一周期称为一个恒星日，它略短于太阳日。二者之间的差异是由于地球自转的同时还在绕日公转。读者可以阅读本书第二章《时间、历法与星空文化》进一步了解这一点。

^⑮ 天球绕着天轴旋转，因而赤纬显然是和时间无关，然而天体和子午圈（天极、南北点所在的球面大圆）之间的夹角是一个与时间有关的量，我们称之为时角。它从子午圈开始，向西转为正，单位为时分秒（实际上等价于角度）。

纬度地区三种情况下的天体周日视运动规律。

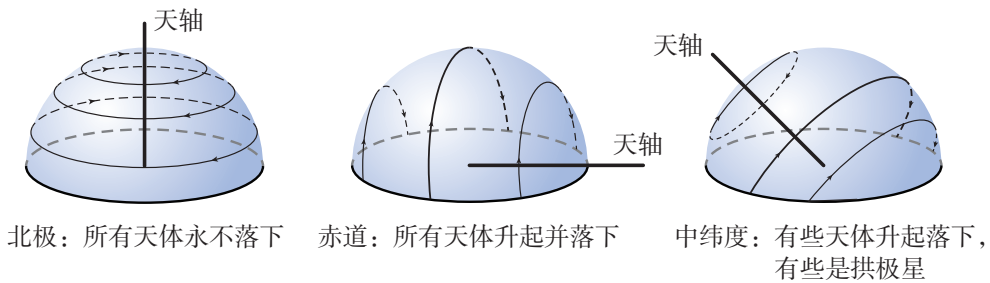


图 1.11 北极、赤道和中纬度地区下天体的周日视运动

太阳的周年视运动

地球在自转的同时，还在绕太阳公转。因此从地球上来看，人们会看到太阳在众星的背景前移动（假设白天也能看到太阳背后的星空背景），周期与公转周期相同，这就是**太阳的周年视运动**。如图 1.12 所示，图中的椭圆是地球绕太阳公转的轨道，地球上的人就会看到太阳在天球上沿外侧的圆形轨道做周年视运动。

太阳周年视运动的轨道称为**黄道**，也就是说，黄道是太阳在天球上一年“走”过的路线。黄道实际上是地球公转轨道的平面（又称黄道面，若将地球看作中心，则该平面就是太阳一年的运动平面）与天球相交的大圆圈。

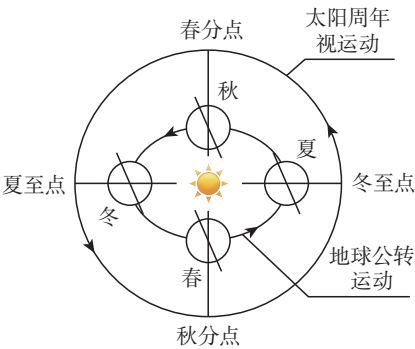


图 1.12 太阳的周年视运动

太阳的周年视运动同时引起了一年四季夜晚星空的变化。如图 1.13 所示，狮子、天琴、飞马、猎户分别是春夏秋冬四季星空中著名的星座，太阳沿着箭头所示的方向做周年视运动，中央的圆代表地球，对着太阳的一面是白天，背着太阳的一面是黑夜。现在假设你半夜站在地球上观星。春季里，太阳在飞马座附近，于是在半夜时，你会看到狮子座当空；夏季时，太阳移到猎户座附近，半夜当空的是天琴座；秋季里，太阳在狮子座附近，飞马座成为半夜星空的主角；到冬季，太阳移向天琴座，于是半夜见到的是猎户座。这就是四季星空变化的原理。

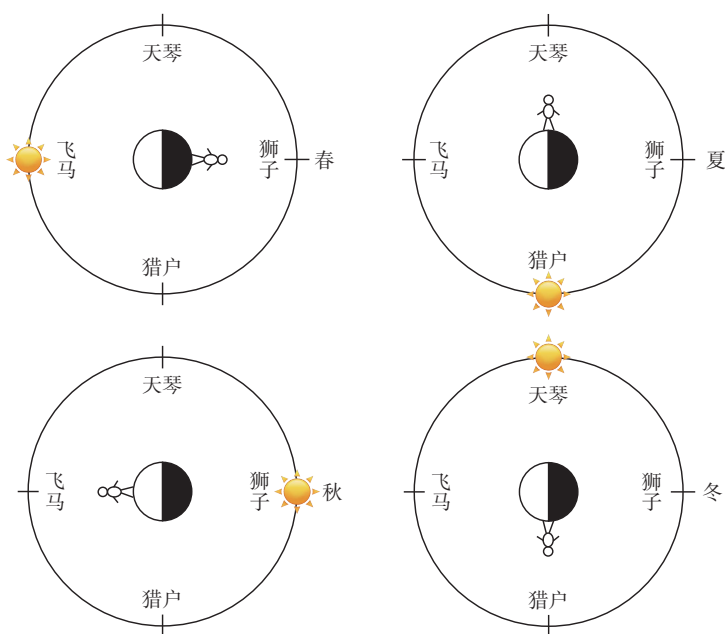


图 1.13 四季星空的变化

黄道坐标系

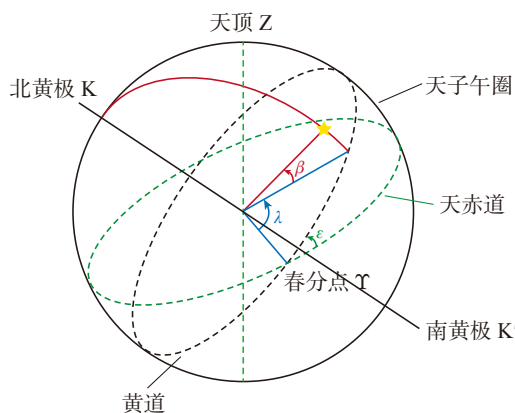


图 1.14 黄道坐标系示意图

黄极，位于天龙座。靠近南天极的称为南黄极，位于剑鱼座。

利用黄道作为基本圈，春分点为原点构建的坐标系就是黄道坐标系。此时的经度叫黄经 (λ)，纬度叫黄纬 (β)。黄经从春分点出发，在黄道上逆时针度量，从 0° 到 360° 。春分日时太阳在天球上的黄经为 0° ，夏至日为 90° ，秋分日为 180° ，冬至日为

在研究太阳系内天体时，我们会经常用**黄道坐标系**来描述天体的位置。与赤道坐标系类似，黄道坐标系以黄道平面为基本大圆，即近似的太阳系行星公转平面建立坐标系。所以该坐标系在描述太阳系内天体的位置，尤其是与太阳的相对位置时更加方便。

黄道与天赤道相交于**春分点**和**秋分点**。每年的春分日太阳在天球上的位置就是春分点，秋分日太阳就在秋分点。以黄道为基本圈，对应的两个极点分别为**北黄极**与**南黄极**。靠近北天极的称为北

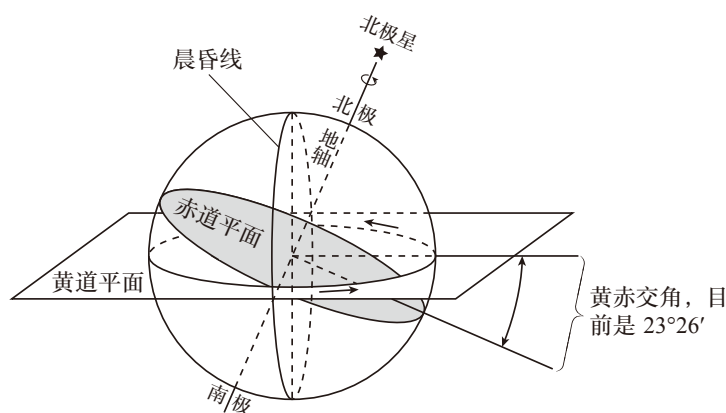


图 1.15 黄道示意图

270°。黄纬从黄道出发，向北为正（0°～90°），向南为负（0°～-90°）。根据定义，太阳在天球上的黄纬一直是 0°。

由于太阳系内天体的共面性，大多数太阳系内的重要天体位置都位于黄道附近，即黄纬绝对值都较小。因此，只需要得知天体间的黄经差异就可以得到两个天体大致的角距离。因为这样的明显优势，描述太阳系内天体相对位置的术语大多是基于黄道坐标系的。如“冲日”描述的是某地外行星在天球上的黄经与太阳的黄经相差 180°的情况，“合日”也一般指的是某行星与太阳的黄经相等的情况。

天体的角距离

在描述天体的方位，或者两个天体之间的距离时，常用的是角度，而非实际的距离（因为这个量很难测量）。在业余观测中，我们经常用自己的手指估计天空中的角度——这是一种很方便的估计方法，可以用于观测时的即时交流。把你的手平举，在一臂之外，你的小拇指宽相对于你眼睛的张角约是 1°，五指并拢约宽 10°，五指张开约宽 20°。

这种估测可能会因人而有微小的差异，读者可以根据已知恒星之间的角距离，“校准”你的身体——一般而言，我们常使用北斗七星来估计自己手势的张角：北斗一和北斗二角距离约为 5°，北斗一和北斗三之间角距离约为 10°，北斗一和北斗五之间角距离约为 15°，北斗一和北斗六之间角距离约为 20°，北斗一和北斗七之间角距离约为 25°。

第二章 时间、历法与星空文化

在夜里仰望天空中闪烁着的璀璨星河总是给我们带来无限遐想，激起我们探索宇宙的欲望。刘慈欣曾说：“浩瀚星空总是能激起我们无穷的想象力。”这片壮丽的星海，就曾激起过古人无穷的想象力。他们将星空想象成皇宫、街市、天神、动物，给天上的星星创造了一个个动听的神话，让今天的我们仍然津津乐道。

除了浪漫的一面，天文学也是一门有用的学科。天文学最早的用途，便是时间与历法的制定。古人根据日月星辰东升西落及其在天球上的位置变化，编定了多种计量时间的方法——历法，许多历法流传至今，仍然在我们日常生活发挥着重要作用。

本章主要介绍时间、历法，以及中国和西方的星空文化。这些内容虽然与天文观测关系不大，但是作为一名天文爱好者还是有必要了解的。

① 时间与计时系统

时间是物质运动中的一种存在方式，是由过去、现在、将来构成的连绵不断的系统；是物质的运动、变化的持续性、顺序性的表现。确定和测量时间，能够标明事件发生的先后，揭示物质变化的快慢，具有重大的意义。

测量时间，要靠物质的周期性运动，以物质运动一周回到原状态经历的时间为基本单位，通过测量其经过的周期数间接测量时间的流逝。同时，还要选取物质的某一运动状态为时间计量的起算点。

根据选取来计时的物质，可将所得到的计时系统分为两类：一类基于太阳、地球等天体的运行，即天文时标；一类基于原子振动的频率，即原子时标。

几种天文时标

从地球上，因为地球的自转，太阳每天绕地球旋转一周，是稳定的周期性运动。所以基于太阳（圆盘中心点）在天球上的位置，就可以得到一种时标——**真太阳时**。真太阳时的基本单位就是太阳绕地球旋转一周的时间，称为**真太阳日**（apparent solar

day)。真太阳日的开始是太阳（圆盘中心点）下中天^①的时刻，也就是午夜——这就是人们对于日（也叫“天”）这个单位最初的定义。

在一日之内计时，就需要比日更小的单位。现在通行的比日更小的单位是时（h）、分（min）、秒（s），这三个单位来自古巴比伦， $1\text{ 日} = 24\text{ 时} = 1440\text{ 分} = 86\,400\text{ 秒}$ 。自下中天时起，太阳“走”的路程占一整圈的比例就是这一日经过的比例，用真太阳时表示。例如，如果自下中天时起太阳在天球上“走”了四分之一圈，那现在的真太阳时就是 6:00。利用时角的概念就可以说：真太阳时等于真太阳的时角加上 12h。

在钟表发明之前，人们常采用日晷计时。日晷的读数就是真太阳时。

由于地球绕太阳公转，所以太阳在天球上的位置是会移动的，真太阳日并不是地球真正自转一周的时间。而真正体现地球自转一周所用时间的时标，叫作恒星时。选取天球上的固定点（一般选春分点），将春分点上中天到下一次上中天的时间间隔称为恒星日。自下中天时起，春分点“走”的路程占一整圈的比例就是这一恒星日经过的比例，用恒星时表示。恒星时等于春分点的时角。

高中地理学过，一恒星日约等于 $23\text{ h }56\text{ min }4\text{ s}$ ^②，略短于真太阳日。这是因为地球每绕太阳一周，会经过约 365 个真太阳日；但是由于地球绕太阳转了一周，所以实际上经过了 366 个恒星日^③。

由于地球轨道是椭圆形，其运行速度随着地球与太阳的距离改变而出现变化，在近日点运行得快，在远日点运行得慢（开普勒第二定律），因此真太阳时欠缺均匀性。再加上黄赤交角的存在，即使太阳在黄道的运动是均匀的，投影到赤道上之后也会变得不均匀。为了纠正这些不均匀性，天文学家虚拟出了一个天体——平太阳（mean Sun）。平太阳每年与真太阳同时通过春分点和秋分点，以均匀的速度在天赤道上运行。

根据平太阳的位置可以定义平太阳时。平太阳时的基本单位就是平太阳绕地球旋转一周的时间，称为平太阳日（mean solar day）。平太阳日的开始是平太阳下中天的时刻，平太阳时等于平太阳的时角加上 12h。

平太阳是想象出来的天体，并不是真正的太阳，这就导致平太阳时与真太阳时并不是完全一致的：平太阳时正午 12 时，真太阳不一定恰好上中天。由于一年中太阳直射点的纬度在上下振荡，所以同一地点的正午太阳高度角也在发生周期性变化，以北半球中纬度地区为例，夏至日正午太阳高度角最高，而冬至日正午太阳高度角最低。如果在每天太阳上中天时，在同样位置拍下一张照片，将所有照片叠加起来，得到的太阳“轨迹”应该是一条直线；而如果不是在太阳上中天时，而是改在平太阳时

① 中天是天体在周日运动的过程中经过当地子午圈的时刻。换言之，上中天是该天体在最高点的位置，也是该天体最接近天顶的时刻，而下中天时天体的位置在天球上的最低点。

② 这里的时、分、秒不是由真太阳日定义的，而是属于原子时标。两种时标中秒的关系将会在后文中介绍。

③ 如果想不明白，可以想象一个 1 元硬币紧贴着另一个 1 元硬币转一圈：这个过程中，该硬币实际转了两圈。

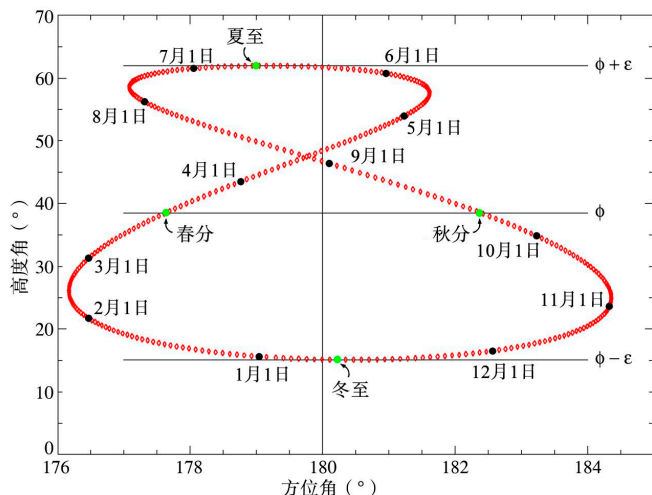


图 2.1 英国格林尼治天文台（纬度 51.4791°N 、经度 0° ）在 2006 年期间每天中午 12:00 观测太阳位置得到的日行迹。图片来源：Wikipedia。

12 时拍摄照片的话，由于平太阳时与真太阳时的时差，太阳的“轨迹”就会发生纵向的偏移，这个时差称为均时差，此时测得太阳的轨迹就是日行迹。在地球上，日行迹呈现“8”字形，如图 2.1 所示。

根据平太阳时可以得到世界时（UT，universal time）的定义。在伦敦格林尼治（Greenwich）天文台测得的平太阳时称为第 0 类世界时（UT0），又叫 GMT（Greenwich Mean Time）。随着测量精度的提升，天文学家发现在不同地点测量的世界时有差别，于是在 UT0 的基础上，各地天文台详细测量了地轴摆动的影响，制定了第 1 类世界时（UT1），以消除这个影响。后来天文学家又制定了第 2 类世界时（UT2），以修正 UT1 由于地球自转的季节性变化导致的季节性变化；但是在实际应用中一般还是常用 UT1 作为世界时。

秒 原子时标

上节介绍了恒星时、太阳时以及衍生出的世界时。这些时标的显著特点是依赖于地球自转。但是科学研究表明，在月球潮汐作用的影响下，地球的自转在逐渐变慢^④，因此，要为时间选一个比平太阳日更稳定的标准。

秒最初的定义即为 1 平太阳日的 $1/86\,400$ 。由于平太阳日的时长并不是稳定的，所以科学家为找到了一个更稳定的周期运动，用于定义时间单位：这就是地球的公转。

根据美国天文学家西蒙·纽康（Simon Newcomb, 1835—1909）编写的太阳表^⑤，

④ 这个结果不是用这节稍后讲的原子钟测出来的，要不然就循环定义了；事实上，它是用石英钟测出来的。

⑤ Newcomb S. Tables of the Motion of the Earth on its Axis and Around the Sun[M]. Bureau of Equipment, Navy Department, 1898.

1956 年国际计量委员会大会通过提案，决定将 1 秒的时长定义为“自历书时 1900 年 1 月 0 日^⑥12 时起算的回归年的 $\frac{1}{31\,556\,925.9747}$ ”。

后来，基于原子振动周期的原子钟为计时提供了更好的稳定性。于是在 1967 年，秒的定义被修改为“铯-133 原子在基态下的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的时间”。这个时间与之前根据回归年得到的时间是完全相等的。

现在天文学上使用的时间单位“日”（符号为 d），是根据秒的定义反推回去的，1 日精确地等于 86 400 秒，而与地球的自转无关。

得到了不依赖于天体运动的单位“秒”，那就可以根据这个单位制定一套计时系统。这种计时系统不依赖于天文观测，与前文介绍的 UT0 等天文时不同，称为**原子时**。**国际原子时**（TAI）自 1958 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒（UT1 时间）开始计时，由国际计量局分散在全球 50 多个国家的 400 多个实验室的原子钟读数加权平均得到。

原子钟自己走自己的，地球自己转自己的，两者之间没有任何联系：这显然是不行的。必须定义一个新的计时系统，使它既有原子时的稳定性，又符合地球和太阳的运行。1972 年 1 月 1 日 00:00:10（TAI），**协调世界时**（UTC, Coordinated Universal Time）正式启用，此刻为 1972 年 1 月 1 日 00:00:00（UTC）。UTC 与 TAI 有着相同的走时速率，都使用国际单位制中基于铯原子定义的秒，而这两套计时系统相差若干个整秒。为什么会有若干个整秒的差距呢？这是为了保证 UTC 符合地球与太阳的运行：国际地球自转服务中心局（IERS）会结合天文观测对 UTC 进行调整：当国际地球自转服务中心局观测到 UTC 与世界时 UT1 之间的差值大于 0.9s 时，它就会发布闰秒决定，在 UTC 中加上或减去一秒，使其与 UT1 的差值不超过 0.9s。闰秒通常是在 12 月 31 日和 6 月 30 日或 3 月 31 日和 9 月 30 日的最后一秒。

自 UTC 启用开始到现在，IERS 一共发布了 27 个闰秒，加上 1972 年 UTC 启用时 TAI 比 UTC 快的 10 秒，TAI 比 UTC 快了 37 秒。

地球上不同地方经度不同，观测到的太阳运行相应也会有数小时的差距，这就是中学地理中学过的**时差**。在地球上，根据经度或国家边界等分为若干个时区。时区以被 15 整除的经线为中心，向东西两侧延伸 7.5°，即每 15° 划分一个时区，这是理论时区。理论时区的时间采用其**中央经线（或标准经线）**的地方时。所以每差一个时区，区时相差一个小时，相差多少个时区，就相差多少个小时。以 0° 经线为中央经线的时区称为**中时区**，在其东边与之相邻的时区称东一区（UTC+1），东一区的区时就是

^⑥ 历书时是天文学家为了克服平太阳时的不均匀性，根据力学理论设计的一套计时系统，现在已经被地球时代替。关于历书时的介绍详见https://en.wikipedia.org/wiki/Ephemeris_time，地球时将在后文讲述；1 月 0 日是历法中常用的表述，指前一年 12 月 31 日。历书时 1900 年 1 月 0 日 12 时指的是 1900 年 1 月 1 日前后平太阳黄经为 279°41′48″.04 的时刻，即 1900 年 1 月 0 日 12:00（UT0）。

UTC 加上一小时。依此类推直到东十二区；西侧同理有西一区（UTC-1）至西十二区（UTC-12）。东十二区与西十二区都以 180° 经线为中央经线，是同一个地区，为避免同一地方日期却相差一天的矛盾，提出**国际日界线**的概念，将其作为东十二区与西十二区的分界线，其东侧（西十二区）比西侧（东十二区）迟整整 24 小时。时区的划分也会受到国界的影响，例如，我国虽然跨了五个理论时区，但是全国属于东八区；国际日界线在堪察加半岛拐了个弯，就是为了避免穿过俄罗斯。

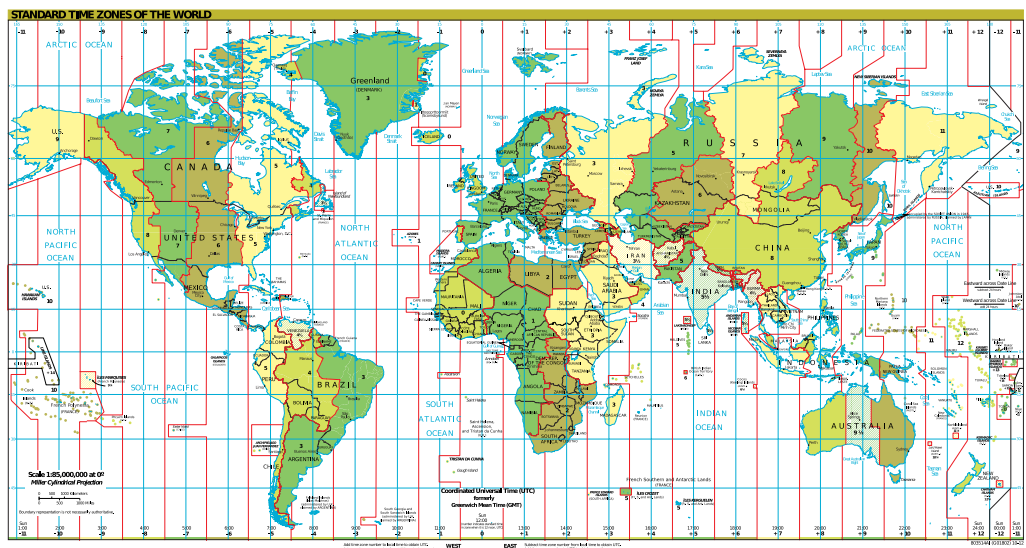


图 2.2 世界时区图

2 历法

历法概论

前文讲述了如何计量比日短的时间，而天文学的另一个重要应用就是编定法则以计量比日长的时间，即**历法**。历法的基本单位是日，通常也会有月、年等单位。在不同历法中，月与年的定义略有差别。有的历法还会有其他时间单位，如星期、世纪等。

根据太阳运行编定的历法称为（太）阳历，如格里历（公历）、儒略历、伊朗历等；根据月球运行编定的历法称为（太）阴历，如回历（伊斯兰历）。农历、藏历等历法，同时参考了太阳和月球的运行，故在天文学上称**阴阳合历**。纯太阳历中无法读取月相、潮汐等信息，纯太阴历则因为年的长度与回归年不等，无法与季节相对应。

根据历法的编算方式可以将历法分为计算历法和天文历法两类。天文历法是以实际天文观测为准编定的历法，如现行农历；计算历法是以严格的数学公式计算编定的历法，如格里历（公历）、犹太历等。天文历法严格与天象相符，与季节、潮汐等自然现象相符，但是局限于天文观测的误差，难以向前或向后延伸：依靠现在的天文观测数据，你无法得知几万甚至几十万年后的朔时时刻刻，你也难以在不查阅历书的情况下计算出元丰六年十月十二日离现在多久。计算历法的优缺点则相反：计算历法可以便利地向前或向后延伸，但是长期使用就会导致误差不断积累，导致历法与季节等自然现象发生较大偏差。在下文中可以看到，这就是公历 1582 年少了十天的原因。

历法的一年一般是整数天，而现实中一回归年的时长并不是整数天，这就导致长期使用固定年长的历法就会出现误差，导致历法无法与季节对应。为了解决这个问题，历法中往往采用置闰措施。即在特定的年份加上一些天数，以将前面积累的误差消去，相应的年份称作闰年（leap year）。不同历法置闰的方式不同，如公历在闰年加上一天，农历则在闰年加上一整个月。

● 农历

农历是中国传统历法的结晶，现在在中国和汉文化圈国家仍普遍使用。作为阴阳合历，农历既可以反映季节、农时和物候特征，又能体现月相变化和潮汐大小等自然现象，这使它在日常生活、农业生产、渔业生产、航海实践等方面具有广泛的实用价值。现行农历的编制规则由国家标准《农历的编算和颁行》（GB/T 33661-2017）给出。

相信读者对下面这首歌谣一定有深刻的印象：

春雨惊春清谷天，夏满芒夏暑相连。
秋处露秋寒霜降，冬雪雪冬小大寒。

这就是著名的二十四节气歌。二十四节气是世界非物质文化遗产，是农历的重要组成部分，对于指导中原地区的农业生产有重要意义。所谓节气，其实指的是一个个时间节点，而并非某一整天。二十四节气的确定，依赖于太阳的黄经（黄经的定义参见第 17 页），恰好对应于太阳处于黄道的二十四个等分点位置的时刻；事实上，“春分点”之所以叫春分点，正是因为太阳处于春分点时对应春分节气。由此可以推出二十四节气所对应的黄经（表 2.1）。二十四节气分为两组：节气和中气，分别对应表 2.1 中深色和浅色区域。

表 2.1 二十四节气对应的黄经

节气	太阳黄经 (°)	日期 (公历)	节气	太阳黄经 (°)	日期 (公历)
冬至	270	12 月 22 日前后	夏至	90	6 月 21 日前后
小寒	285	1 月 6 日前后	小暑	105	7 月 7 日前后
大寒	300	1 月 20 日前后	大暑	120	7 月 23 日前后
立春	315	2 月 4 日前后	立秋	135	8 月 8 日前后
雨水	330	2 月 19 日前后	处暑	150	8 月 23 日前后
惊蛰	345	3 月 5 日前后	白露	165	9 月 8 日前后
春分	0	3 月 21 日前后	秋分	180	9 月 23 日前后
清明	15	4 月 5 日前后	寒露	195	10 月 8 日前后
谷雨	30	4 月 20 日前后	霜降	210	10 月 23 日前后
立夏	45	5 月 6 日前后	立冬	225	11 月 7 日前后
小满	60	5 月 21 日前后	小雪	240	11 月 22 日前后
芒种	75	6 月 6 日前后	大雪	255	12 月 7 日前后

由于二十四节气依赖于太阳的位置，所以其日期大体上与公历日期接近。为什么不完全与公历日期相等呢？这是因为公历实际上是计算历法，并不完全符合天象。公历年的长度为 365 或 366 天，与回归年的长度有几小时的偏差，而节气完全依赖于天文观测，相邻两个春分间隔恰好是一回归年，这就造成了节气所在日与公历日期的出入。

我们常说某天是农历几月初几，这个日期的确定主要依赖于月球的位置。现代农历的时间采用北京时间^⑦，农历以朔时所在的那一天为月首，朔日就是这个月的初一日。由于一朔望月的长度约为 29.5306 天，故农历一月的长度为 29 天（小月）或 30 天（大月）。月球绕地球的运动大致是均匀的，所以望时大约在两个朔时的中点，因此农历每月十五日都能看见一轮圆月；若朔时在朔日的较晚时刻，那望时可能相应地偏移 to 农历十六日，这也就是我们所说的“十五的月亮十六圆”。

农历以十二个月为一年。朔望月的长度约为 29.5306 日，回归年的长度约为 365.2422 日；显然两者并不能整除，长期使用就会出现误差——为此，农历采取了闰月的方式。因为 $\frac{365.2422}{29.5306} \approx 12\frac{7}{19}$ ，即每过 19 年就会多出 7 个月来，所以我们常说农历是“十九年七闰”。十九年是一个重要的时间单位，中国古人把十九年称作章。

^⑦ 古代采用的是制历机构所在地区的真太阳时，如明清时期采用的是北京古观象台的真太阳时；民国时期曾先后采用北京地方平太阳时（《新法天文夏历》，1914—1928）和东经 120° 平太阳时（《紫金历》，1928 以后）；国家标准《农历的编算与颁行》中规定农历采用北京时间（即 UTC+8）。

如何确定农历闰哪个月呢？二十四节气中，古人最看重的是冬至，表 2.1 也以冬至打头。编定农历时，以冬至所在的月份为十一月。如果两个冬至之间有十三个朔日，那就需要对其中的一个月份置闰，也就是把它设置为上个月的闰月。被置闰的那个月是这两个冬至之间第一个没有中气的月份。

这样就确定出了农历的各个月份。农历一月称“正月”，十一月和十二月分别也可以叫做“冬月”和“腊月”。农历一年始于正月初一日北京时间 0 时 0 分 0 秒。根据农历的编算方式，一农历年有 12 个朔望月（平年）或 13 个朔望月（闰年）。所以农历平年的长度是 354 或 355 天，闰年的长度是 383 或 384 天。

公历——儒略历与格里历

现在世界上通行的公历，最早起源于古罗马。其历史可以分为儒略历和格里历两个时期。儒略历和格里历的区别就在于置闰方式。

儒略历是古罗马实行的历法。它由希腊天文学家索西琴尼（Sosigenes）设计，罗马共和国执政官儒略·恺撒（Julius Caesar）于罗马建城纪年 709 年（公元前 45 年）1 月 1 日颁布实施，是公历的前身。儒略历选用罗马执政官上任的日期作为 1 月 1 日，即一年的开始。儒略历的制定主要根据太阳的运行，是一种太阳历；其月与年的时长固定，从而编制儒略历完全依靠数学计算，因此儒略历是数学历法。

儒略历一年共 12 个月，一年共有 365 天，现今公历与之保持一致，每月的时长相信读者早已烂熟于心，这里便不再赘述。由于测量精度不够，那时人们认为一回归年的时间 365.25 日，这样四年就会少掉一天；因此儒略历规定每四年一闰。

当然，现在精确的天文观测表明，一回归年并不严格等于 365.25 日（365 天 6 h，而是约为 365.2422 日（365 天 5 h 48 min 46 s），每年都会产生约 12 min 的误差，所以，长期使用儒略历，势必会造成很大误差。于是在 1582 年教皇格里高利十三世（Gregorius XIII）进行了历法改革。

进行历法改革的直接原因就是复活节的计算与春分点漂移。复活节（Easter）是天主教的传统节日，其日期在每年春分月圆后的第一个星期日。因此，为了计算复活节的节日，就要确定春分的日期。长期以来，在计算复活节日期时，都是以 3 月 21 日为春分；但是因为儒略历年与回归年每年约 12 min 的微小误差，到 1582 年时，实际的春分已经与 3 月 21 日偏离了超过十天。于是，在意大利医生、哲学家阿洛伊修斯·里利乌斯（Aloysius Lilius）等人的提议下，进行了历法改革，推行新历法——**格里历**（Calendarium Gregorianum），也就是现在的公历。

改革后的历法在儒略历的基础上修改了置闰方式，取消对整 100 但是不整 400 的年份（如 1500 年）置闰。这样，每 400 年中的闰年数就从原来的 100 个变成了 97 个。

因此，一年的平均长度变成了 $\frac{365 \times 400 + 97}{400} = 365.2425$ 天。可以看见，格里历的精确度相比儒略历有所提升。但是，看到这，你可能会问：回归年不是 365.2422 天吗？那每年相差的 0.0003 天该怎么办呢？如你所见，这个误差实在是太小了，要累积 3200 年才会有一天的误差，而从儒略历使用算起，到现在也才过去两千多年——所以这个问题就留给那时候的人们考虑吧！

为了让春分日回到 3 月 21 日附近，就得去掉 1582 年以前儒略历多置出来的闰日，合计共 10 天。因此，新历法移除了 1582 年 10 月 5 日至 14 日这十天——也就是说，1582 年 10 月 4 日（万历十年九月十八）的后一天就是 1582 年 10 月 15 日（万历十年九月十九）。

新历法一经颁布，就广泛被天主教国家所采用，但也有的国家仍继续沿用儒略历：大英帝国直到 1752 年才从儒略历改成格里历，而俄国直到 1918 年后才从儒略历改成格里历。发生于格里历 1917 年 11 月 7 日的革命，按照俄罗斯当时仍在使用的儒略历，发生于 1917 年 10 月 25 日，所以它叫作“十月革命”。

儒略历在现在还有一些用处。在表示公元前 45 年以前的时间时，为了历法的连续一致性，使用的是儒略历，而非更为精确的格里历。由儒略历一年平均长度 365.25 日^⑧所定义的**儒略年**是国际天文联合会推荐的时间计量单位，也被用于儒略历元。

历元

在星表中常常可以看见“历元”一词。**历元**（epoch）在天文学是一些天文变数^⑨作为参考的时刻点。

现在星表等使用的标准历元是 J2000.0。前面的“J”表示这是一个**儒略历元**（Julian epoch）。这里的“儒略”指的是儒略年（符号为 a），而不是儒略历或儒略日。J2000.0 代表的时刻是格里历（不是儒略历）2000 年 1 月 1 日地球时（TT）12:00^⑩。在其之后的其他历元应该按照儒略年，遵守 365.25 日每年的间隔。也就是说，J2100.0 历元对应的时刻就是 J2000.0 加上 36 525 日，也就是格里历 2100 年 1 月 1 日 12:00。由于格里历与儒略历的一年长度不尽一致，在数百年后儒略历元的日期将会与格里历产生分歧。

上一个使用的标准历元是 B1950.0，它是**贝塞尔历元**（Besselian epoch）。与儒略历元类似，贝塞尔历元是由贝塞尔年所定义的。贝塞尔年的“新年”是平太阳黄经为 280° 的时刻。这个时刻在冬至与小寒之间，与格里历新年非常接近。历元 B1950.0 所

⑧ 这里的“日”指的是 86 400 秒，“秒”采用国际单位制的定义。

⑨ 比如天体的天球坐标、光度、轨道参数等。这些参数因为摄动会随时间的变化而变化，故需选定一个参考点。

⑩ 地球时是一种力学时标，用于星历表中。地球时比 TAI 快 32.184 s，单位也是 SI 秒。关于地球时的更多介绍，详见本章补充阅读部分。

指的就是贝塞尔年 1950 年开始的时刻。

儒略日

为了方便计算两个日期的间隔，天文学家采用了**儒略日**。儒略日是一种不用年、月的长期纪日法，儒略日由法国学者约瑟夫·斯卡利杰（Joseph Justus Scaliger）于 1582 年创制，名字“儒略”是为了纪念约瑟夫的父亲儒略·斯卡利杰（Julius Caesar Scaliger）。从这里可以看出，儒略日与儒略历的名字一样只是巧合，并没有什么内在联系。

儒略日的起算点是儒略历公元前 4713 年 1 月 1 日正午 12:00。之所以选取这个奇怪的时间，主要有两个原因：① 它是儒略周期^⑪的开始；② 它发生在当时已知的所有历史事件之前。某“天”^⑫的**儒略日数**（Julian day number, JDN）指的是从起算点到该“天”所经历的整日数。某时刻的**儒略日期**（Julian date, JD）则是该“天”的儒略日数加上该“天”已经过去的时间占一“天”时间的比例。例如，2021 年 7 月 1 日 12:00 至 2021 年 7 月 2 日 12:00 这一“天”的儒略日数是 2 459 459，则对于 6 小时（0.25 “天”）之后的 2021 年 7 月 1 日 18:00，它的儒略日期就是 2 459 259.25。

可以看到，由于起算时间过于久远，儒略日期的数字通常都很大。为了表示方便，国际天文学联合会于 1973 年采用**简化儒略日期**（Modified Julian Date, MJD）。简化儒略日期的定义为

$$\text{MJD} = \text{JD} - 2\,400\,000.5,$$

可以推算出，其起算时间是 1858 年 11 月 17 日 0 时。前文中计算了 2021 年 7 月 1 日 18:00 的儒略日期是 2 459 259.25，因此它的简化儒略日期是

$$2\,459\,259.25 - 2\,400\,000.5 = 59\,259.75.$$

读者可以在 <https://ssd.jpl.nasa.gov/tc.cgi> 获取某时间的儒略日期。

③ 中国古代天文学简说

中国古代星官

参宿四、轩辕十四、犴道增七……这些古典优雅的名字都是来自中国古代命名方法。像西方的星座一样，中国也有一套星空的划分与命名体系，可以把天空划分成三垣四象二十八宿^⑬，三垣和二十八宿之下设有星官。特别地，东西方古代的星座或星官都没有严格的分区，只有模糊的界限，现代星座的精确界限是 1928 年由国际天文学联合会划定的。

^⑪ 儒略周期的具体定义与计算，请参见本章补充阅读部分。

^⑫ 需要注意的是，由于起算点是正午 12 时，所以此处用带引号的“天”指某天正午 12 时到第二天正午 12 时。

^⑬ 二十八宿包含在四象中，具体归属在下文中会详细介绍。

所谓三垣就是指紫微垣、太微垣、天市垣，紫微垣大致位于拱极星区，在中国古人的想象中，紫微垣的星官大多是皇亲国戚或重要的大臣，比如“四辅”“三公”，所以民间常有明君是紫微星转世的传说；太微垣则是文武百官的位置，如“虎贲（bēn）”“郎位”，主要占据的是春季星空；而天市垣则代表天上的街市城镇，比如“帛度”“屠肆”，大多在夏季星空，在武仙座、蛇夫座及其附近。

而四象指的是苍龙、白虎、朱雀、玄武，再具体到二十八宿则是：

东方苍龙七宿是角、亢、氐（dǐ）、房、心、尾、箕（jī）；

北方玄武七宿是斗（dǒu）、牛、女、虚、危、室、壁；

西方白虎七宿是奎、娄、胃、昂、毕、觜（zī）、参（shēn）；

南方朱雀七宿是井、鬼、柳、星、张、翼、轸（zhěn）。

二十八宿的位置和月亮运行的轨迹大致重合，差不多月亮每天经过一宿。在春分那天，向南方看，是朱雀七宿，向东方看，是苍龙的头部，像西方看，是白虎的尾部，而玄武则隐没在地下，无法看见。每一个宿都有好几个星官，所谓的弧矢就属于井宿。据考证，苏轼词中的“西北望，射天狼”，其实是由于弧矢这一星官是弓箭的样子（古代把弓称弧箭称矢），而天狼星在弧矢的西北方，所以有此说。

此外，中国古代还有分野、星纪等复杂的关于星空的说法，在此不再详述，读者可以参考丁锦孙《中国古代天文历法基本知识》、王力《中国古代文化常识》等书。

中国古代星空的故事

对于中国古代星空的故事，大家比较熟悉的大概是牛郎织女，对于其他星官的故事却没什么了解。但其实中国古代对星空的划分都是与地上的事物对应的，其他星官也有很多的故事。这里我们举一个例子。

仙后座天区在中国古代被分为王良、策和阁道三个星官。其中，王良星官最亮的星是王良四，另外四颗星是驾车的四匹马。据《淮南子·览冥训》《史记·赵世家》等书籍记载，王良是春秋时代为赵襄子驾车的驭手。公元前452年，智伯瑶胁迫韩魏共同攻打赵襄子。襄子乘坐由王良驾驭的驷马车飞速逃过了知伯的追捕，并找到机会向韩魏申明利害，最终联合韩魏灭了智伯瑶。

在王良星官西侧，有另一位优秀的驭手造父，造父的南侧是车府七星，再向西是车的发明者奚仲，奚仲的南侧则为辇道五星，顾名思义，辇道应是车辙。这些星官构成了中国古代星空中的车马世界。

中国古代天文与历法在社会中的作用

历朝历代，中国古代天文学的要义均为“观象授时”，也就是观测天象，制定历法的意思。由于历法有着“顺时施政，指导农功，综理人事”的重要功能，“观象授

时”也就被视为立国之本。正因为如此，观象、治历、授时、施政成为了帝王的第一要务，而使用观象台、保存浑仪、制定与颁布历法也成为了皇权地位的象征。西周时，每年周天子向各诸侯国颁授该年历法后，诸侯需放在祖庙里供奉。原本作为帝王颁布历法所在地的明堂，也有了皇权的象征。此外，浑仪除观测作用外也是帝王重要的礼器。改朝换代时，除了带走前朝的图书档案外，也均要带走前朝的浑仪。君王登基后要做的第一件事，就是定正朔（修改历法，确定正月初一是哪一天）。而大臣则要奉正朔，表示自己服从帝王的统治。

中国古代天文与历法的发展与成就

中国人一直对天文学有较高的重视度，自公元前 24 世纪起就有专职的天文官员。经考证，世界上最早的哈雷彗星记录出自我国《淮南子·兵略训》中的“武王伐纣，东面而迎岁……彗星出而授殷人其柄”，约在公元前 1046 年。

西汉时期，天文学家落下闳编制了《太初历》，首次将二十四节气纳入历法，有利于农事的发展。据史书记载，他还是浑天说的创始人之一，并根据浑天说发明了第一台浑仪，测定了二十八宿的距度、五大行星的运动情况。同时，根据测量结果，他发现了日月沿赤道运动的不均匀性，这为后来黄道、白道的概念打下了基础。他也是提出“朔望之会”，也就是日食、月食周期概念的第一人。

东汉时期，我国著名天文学家张衡著《灵宪》，阐述日月星辰的运动、天地结构等天文学问题，将中国天文学提升到了前所未有的高度。同时，他改进了浑仪等天文仪器，极大地方便了天文观测的进行。他还推荐使用最精确的历法《九道法》，承认了月球运动的不均匀性，也测量出了回归年的长度为 365.25 天。

公元 1262 年，郭守敬开始制定新历法。在此期间，郭守敬创造了简仪、仰仪、玲珑仪、立运仪等一系列的天文仪器，并在全国各地建立观象台。其中，简仪被公认为是世界上最早的赤道仪，早于第谷 300 年。利用河南登封观象台的巨型圭表，郭守敬测得回归年长度为 365.2425 天，与现行公历完全相同。根据这些观测结果，郭守敬制定了当时最先进的历法《授时历》，并沿用了 340 年。

到了明清时期，西方与中国的交流逐渐增加，利玛窦、汤若望、南怀仁等人来华，他们将西方的天文学传入中国，也将中国的文化与科学翻译并传播到西方。崇祯二年（1629）年起，中国天文学家徐光启、李天经与西方传教士龙华民、邓玉函、汤若望、罗雅谷等人用五年时间共同编撰了《崇祯历书》。这本书引进了圆形地球的概念，介绍了经度和纬度的概念，并结合了第谷星表和中国传统星表，提供了第一个全天性星图，成为清代星表的基础。青年天文学会会星辇道增七等一系列“增星”，就是这一时期加入中国星表的。《崇祯历书》标志着欧洲古典天文学已被吸收和融汇到中国天文学之中了，参与编书的汤若望由此成为首位担任钦天监监正（官职名）的外国人。

后来，康熙通过实践证明西洋历法更加准确，于是清朝历法改为以西洋历法为基础的《时宪历》。

与此同时，西方的天文仪器也传入中国，包括用于观测的日晷仪、简平仪，与用于哥白尼日心体系的七政仪等。后来，南怀仁、纪理安、戴进贤先后铸造了现在北京古观象台上的八架大型天文仪器，这些仪器采用西方 360 度制，造型与设计样式采用中西合璧的方式，是中西方天文学共同的无价瑰宝。

时间来到咸丰九年（1859 年），清朝学者李善兰与英国传教士伟烈亚力将威廉·赫歇耳所著的《天文学纲要》翻译为中文并出版，名为《谈天》。书中首次向中国介绍了一系列天文学上的新发现：恒星周年视差、光行差、天王星等等。这本书也正确介绍了哥白尼的太阳系学说，近代天文学首次被系统地传入中国。

中国古代天文仪器——浑仪简介

浑仪是中国古代重要的天体测量工具，由西汉落下闳发明，并由东汉张衡、唐代李淳风、北宋沈括等人不断改造，并形成了如今所见的模样。图 2.3 即为北京古观象台的浑仪，为 2002 年仿造南京紫金山天文台的明代浑仪所铸。

浑仪分为内、中、外三层，结构如图 2.4 所示。其中外层为六合仪（六合即上下东西南北），由地平圈、子午双圈、外赤道圈组成。该层固定不动。地平圈上由天干地支标记着各方位，其中正北为子，正南为午。子午双圈指向正南正北方向，地轴倾斜穿过此圈。外赤道圈也叫天常赤道圈（与游旋赤道圈做区分），相当于现在的天赤道，该圈上面刻着日期与时间，相当于现在的恒星时，用来确定三辰仪旋转的位置。

中层为三辰仪（三辰即日月星），由内赤道圈、黄道圈、二分圈、二至圈构成，该层可绕地轴进行旋转。内赤道圈也叫游旋赤道圈，刻有周天度数与二十八星宿的位置，用来测量入宿度（相当于现在的赤经）。使用时，根据时间与日期绕地轴转动三辰仪，就可以使得三辰仪的位置与天球的对应位置吻合。

内层为四游仪，由四游环、窥衡组成，该层可在三辰仪内绕地轴旋转。四游环也



图 2.3 浑仪实物图，摄于北京古观象台

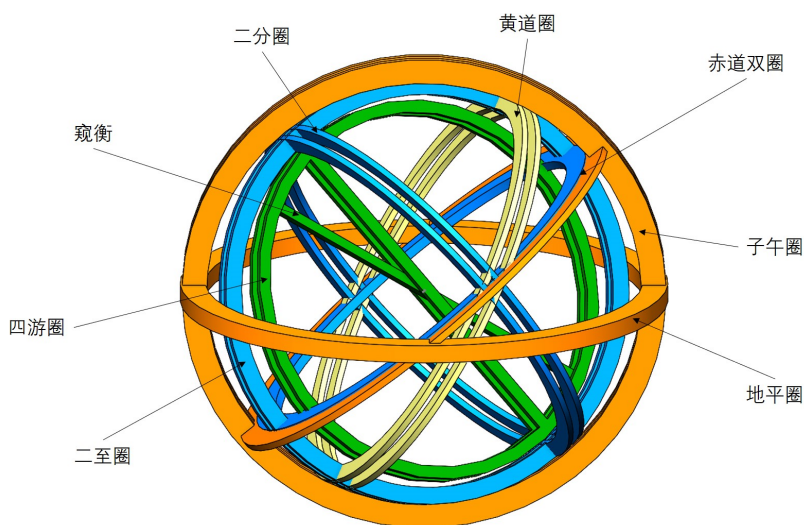


图 2.4 浑仪原理图

叫赤经环，环面上刻有周天度数。窥衡（也就是窥管）夹在四游环上，可以在双环里滑动。转动四游环，并移动窥衡的位置，就可以观测任何的天区。窥衡对准待测星体后，读取四游环与游旋赤道圈的读数，即可读取天体的赤经、赤纬。

4 西方星空文化

由于恒星在天空中的位置是固定不变的，在西方，人们将天球上的星空排列想象成了许多图案图形，这就是星座。古巴比伦、古埃及、古希腊、古罗马人均有星座的概念，并利用神、英雄或动物的名字为它们命名。许多星座可以从形状上一眼看出命名的来由，比如狮子座、天鹅座；另一些则是人们完全凭借想象赋予的，与其形状几乎没有任何关系。由于这些古文明互相存在着交流，因此这些星座的命名有着许多的相似之处。不过希望读者注意，星座的神话是以希腊神话等为基础的二次创作，是星座的形状让人联想到了那些神话的内容，才赋予了星座这些传说，而希腊神话本身是不包含任何一个星座的。下面将简单介绍四季星空的主要星座与黄道星座的一些星空神话^⑭。

春季星空：大熊座、小熊座、猎犬座、牧夫座的传说

有一次，宙斯爱上了月神的一位侍女，名叫卡利斯托（后来伽利略以此命名了木卫四）。不久卡利斯托便怀孕生下了宙斯的儿子阿卡斯。知道这件事情之后，愤怒的

^⑭ 这里介绍的星空神话仅仅是常见的版本，许多星座神话有多个不同版本，后文中也有提及。

天后赫拉把卡利斯托化为一只大熊，使她失去了迷人的美貌，只得在森林里生活下去。过了许多年，卡利斯托的儿子阿卡斯长大，并成为一名出色的猎手。这一天，阿卡斯正在森林里打猎，卡利斯托认出了自己的儿子，忘了自己是熊身的她身不由己地向他跑了过去。但是，阿卡斯并不知道这只可怕的大熊是自己的母亲，便向这只熊举起长枪。就在这个危险的时候，宙斯急忙将阿卡斯变成一只小熊。变成熊的阿卡斯认出了自己的母亲，从而避免了一场弑亲的悲剧。后来宙斯又将两只熊一同带到天上，并在众星之中给了他们两个荣耀的位置，这就是在北天闪耀的大熊座与小熊座。

恼羞成怒的赫拉于是派了一个猎人带着两只凶恶的猎狗，紧紧地追赶在这两只熊的后面。这个猎人就是天上的牧夫座，而他牵着的两只猎犬就是猎犬座。古希腊人看到这对母子夜夜都在天上徘徊，永远也不落到地平线下面，他们认为这一定又是赫拉的鬼把戏。原来，赫拉又来到碧波万顷的大海上，去求她的哥哥——海神波赛冬的帮助。海神听信了妹妹的一面之词，便答应了她的要求。因此，我们可以看到，这对母子只能在天上不断奔跑，无法沉到地平线之下，到海神的领地去休息。不过这样，卡利斯托就可以时时守在她的阿卡斯身边，免得赫拉又想出什么坏主意。

在另一个版本的传说中，宙斯将阿卡斯变成了牧夫座。而牧夫座主星大角（Arcturus）在希腊文中的意思就是“熊的看守者”。

夏季星空：天鹅座、天鹰座、武仙座的传说

古希腊人认为，天鹅座和天鹰座是宙斯的化身。在希腊神话中，宙斯曾变形为一只白天鹅，飞向美丽的公主勒达。勒达为他生下一对孪生子，就是后来的双子座卡斯托尔和波吕丢克斯。另一次，宙斯化为一只天鹰，劫持了特洛伊的王子盖尼米得（后来伽利略以此命名了木卫三），飞向了奥林匹斯山，成为了众神的斟酒官（盖尼米得就是宝瓶座）。宙斯为了纪念这两次出行，将自己化身的天鹅、天鹰永远留在了天上，成为了天鹅座、天鹰座。

说起希腊神话，不能不提的是武仙座赫拉克勒斯。他是希腊神话核心人物之一，传说他留给世人的有十二大功绩（狮子座就是宙斯将他杀死的狮子升入天界，使世人永远铭记他的功绩）。而他在星空中的形象，正是他大战海德拉的时候。

海德拉是生有九个头的大毒蛇，它在草丛里神出鬼没，为害四方。更可怕的是，它的头中最大的那个是杀不死的，砍掉了，又会生出两个新的头。赫拉克勒斯同朋友伊俄拉俄斯前来杀它，海德拉非常聪明，它昂着头，等着赫拉克勒斯的进攻。赫拉克勒斯走上前去，一刀砍下了最大的蛇头。令他大吃一惊的是，毒蛇的脖子上立刻又长出了两颗新头，十个头摇摇摆摆，令人毛骨悚然。就在赫拉克勒斯苦苦思考对策的时候，天后赫拉派来的一只大螃蟹悄悄爬了过来，用两只大螯紧紧地咬住了赫拉克勒斯的脚。赫拉克勒斯回过身，用一棵大树猛地一击，把巨蟹打得粉碎（后来赫拉为了感

谢螃蟹的帮助，将它升为巨蟹座)。

杀死了巨蟹，他呼喊同行的伊俄拉俄斯来援助他，伊俄拉俄斯执着火把，把附近的树林点着，然后用熊熊燃烧的树枝灼烧刚长出来的蛇头，不让它长大。这时，赫拉克勒斯乘机砍下海德拉的那颗不死的头，将它埋在路旁，上面压着一块沉重的石头。接着，他又把蛇身劈作两段，并把箭浸泡在有毒的蛇血里。从此以后，中了他箭的敌人再也无药可医。在后续的一次冒险中，他误伤了他的好友：智慧的人马喀戎。喀戎因为受不了浸了毒血的箭伤的痛苦，放弃了永生。后来，喀戎成为了夜空中的人马座。

秋季星空：仙王座、仙后座、仙女座、英仙座、鲸鱼座的传说

在古希腊神话中，埃塞俄比亚国王刻甫斯与他自负虚荣的妻子卡西奥佩娅有一个异常美丽的女儿，名叫安德罗墨达。有一天王后冒犯了众神，因为她说她的女儿比涅瑞伊得斯海仙女还要貌美。海仙女向海神波塞冬告状，愤怒的波塞冬把恐怖的海怪刻托派到了埃塞俄比亚。这只喷火的怪兽把整个国家变成了荒漠，无助的人们不得不向国王求助。国王请求神谕，结果令他不寒而栗：他必须交出自己唯一的女儿，可怕的怪物才会消失。

犹豫了一段时间后，国王不得不让人把安德洛墨达锁在海中的山崖上。就在海怪出现在她面前，马上要吞了她时，希腊神话中重要的英雄帕尔修斯出现了。在前一次冒险中，帕尔修斯取得了蛇发女妖美杜莎的头（美杜莎死后，脖子里窜出了一匹飞马，这就是飞马座珀伽索斯），任何人看到这颗头均会变为石头。帕尔修斯将这颗脑袋送到了海怪的面前，海怪立刻变成了石头。帕尔修斯救出了公主安德罗墨达，并结为夫妻。

后来，众神将他们均升为星座：国王成为仙王座，王后成为仙后座，安德罗墨达成为仙女座，帕尔修斯成为英仙座（英仙座的大陵五正是美杜莎的眼睛），海怪刻托成为了鲸鱼座。

冬季星空：猎户座、大犬座、小犬座、天兔座的传说

希腊神话中，俄里翁是神界中有名的狩猎者，他不但擅长打猎，而且力大无穷，外表更是高大健壮又英俊，因此变得骄傲自大，他到处向人吹嘘，自己是世界上最伟大的狩猎专家，没有一种动物见到他不害怕的，因此得罪了天后赫拉。为了要惩罚这个狂妄的猎人，赫拉派了一只毒蝎子，在俄里翁每天会经过的路上埋伏，想趁着他不注意时袭击他。当俄里翁发现毒蝎子时，为时已晚，他的一不留神，竟被毒蝎子给螫了一下，没多久便毒发身亡。就在他倒下的同时，身体恰巧压在来不及闪避的毒蝎子上，毒蝎子也就这样被活活压死了。赫拉因为这只毒蝎子尽忠职守，于是便将它升到天上，成了天蝎座。俄里翁则被主神宙斯升到天上，成为了猎户座。据说，俄里翁仍

然在逃避毒蝎子的追击，因此夜晚的星空上，只要天蝎座出现，猎户座就会从另外一边消失的无影无踪，等到天蝎座落下，猎户座才又会高高升起。这两个星座就这么永远的在天空中追逐，彼此互不相见。

在古罗马神话中，这个故事还有后续：俄里翁死后，他的猎犬非常孤单，整日哀嚎，于是朱庇特（相当于希腊神话中的宙斯）将这只猎犬也升入天界，成为大犬座，以陪伴他的主人。怕大犬孤单，于是在它附近安放了一只小犬（小犬座）。由于猎犬生前爱好打猎，于是在它附近又放了一只兔子（天兔座）。

黄道十二星座传说与其来源简介

在不同月份，太阳在地球上的位置不同，因而处在不同的星座。根据一年 12 个月，古希腊人将黄道等分为 12 份，并将在每一份中的主要星座（因为星座的大小与之间的角距离不同，故无法等分）合称为黄道十二星座。由于不同季节太阳所处星座不同，因此这些星座被赋予的传说不同。比如由于古希腊时春分点位于白羊座，故白羊座、金牛座象征着播种与希望。古希腊人赋予了白羊座“阿尔戈金羊毛”这一美丽的传说，古埃及人则认为金牛座是将太阳放在牛角上的圣牛。而位于（古希腊时期）秋分点的处女座，不同文化均赋予了其丰收女神的形象。

同时，秋分点也在天秤座附近，这一天昼夜等长，因此它被赋予了均衡、平衡的含义。古埃及人认为，阿努比斯就是利用天秤座称量灵魂与羽毛的重量。宝瓶座的来源是这段时间处于欧洲的雨季，那片区域的其余星座（摩羯座、双鱼座、水蛇座、波江座、南鱼座、海豚座）也均与水有关。在古埃及，由于太阳处在狮子座的位置时，尼罗河正好爆发洪水，这次洪水决定了这一年的丰收情况，因此古埃及对狮子座非常尊敬，现在依旧存在的石狮子喷泉就与此事有关。

补充阅读

历书时·力学时标

历书时是由纽康的太阳表定义的。纽康根据 1750 年至 1892 年的天文观测数据编制了这份太阳表。

纽康的太阳表所选定的历元是 1900 年 1 月 0 日 GMT 正午 12 时。他在表中给出了平太阳黄经的计算公式：

$$L = 279^{\circ}41'48''.04 + 129\,602\,768''.13T + 1''.089T^2.$$

式中, T 指的是自该历元起所经过的儒略世纪数。1 儒略世纪在此处指的是 36 525 个纽康认为的平太阳日。

因此, 1900 年 1 月 0 日 12 时起算的回归年包含

$$\frac{360 \times 60 \times 60}{129\,602\,768.13} \times 36\,525 \times 86\,400 = 31\,556\,925.9747 \text{ 历书秒}.$$

这就是 1956 年 SI 中秒的定义的来源。

1939 年, 英国天文学家斯宾塞·琼斯 (Spencer Jones) 根据实际观察指出, 纽康的数据要加上修正:

$$\Delta L = +1''.00 + 2''.97T + 1''.23T^2 + 0.0747B.$$

其中 $0.0747B$ 为由月球观测中推算出的修正项。此处的 T 就是真正的平太阳时了。

修正后的公式即为

$$L = 279^{\circ}41'48''.04 + 129\,602\,771''.10T + 2''.319T^2 + 0.0747B.$$

可见, 纽康的太阳表中的时间系统并不是真正的平太阳时。但是由于这种时标是依据地球的公转所确定的, 可以克服地球自转不均匀带来的影响, 所以我们反过来用纽康的公式来定义一个新的时标, 这就是**历书时**。当时间用历书时表示时, 平太阳黄经符合纽康太阳表中的公式。

像历书时这样, 采用天体轨道运动 (注意与地球自转区分) 定义的时标, 称为**力学时标**。

在纽康编制太阳表的年代, 相对论还未发现, 所以历书时并没有考虑到相对论效应。因此, 国际天文联合会 (IAU) 创立了**地球力学时** (Terrestrial Dynamical Time, TDT) 与**质心力学时** (Barycentric Dynamical Time, TDB) 用于代替历书时。由于考虑了相对论效应, 新的时标应该与参考系相关: 地球力学时选取的参考系是地心, 质心力学时选取的参考系是太阳系质心。

在 1976 年 IAU 制定了新力学时标的标准:

① 在 1977 年 1 月 1 日 00:00:00 (TAI), 地球力学时设定为 1977 年 1 月 1 日 00:00:32.184 (这个时间是根据历书时与世界时的差距得出的);

② 新力学时标的单位是日，由 86 400 个 SI 秒组成。

③ 质心力学时与地球力学时之间只存在周期性变化。

同历书时的含义类似，地心力学时就是地心参考系中（由天体力学理论计算出的）星历表的所使用的时标。地心力学时是历书时的延续，其走时速率与 TAI 一样，但比 TAI 快 32.184 s，即 $TDT = TAI + 32.184 \text{ s}$ 。

质心力学时（TDB）是相对于太阳系质心的运动方程中的自变量。通常 TDB 是由 TDT 经过数学变换得到的，变换的方程则由太阳系天体的位置和运动状态，借助万有引力理论给出。常用的变换方程是

$$TDB = TDT + 0^s.001\,658 \sin g + 0^s.000\,014 \sin 2g$$

其中

$$g = 357^\circ 53' + 0.985\,600\,3(\text{JD} - 2\,451\,545.0)$$

JD 为儒略日期，精确到两位小数。

西奥多·莫耶（Theodore D. Moyer）在 1981 年给出了一个更精确的表达式^⑮：

$$\begin{aligned} \text{TCB} - \text{TCG} = & \Delta T_A + \frac{2}{c^2} \sqrt{(\mu_{SA})e \sin E} + \frac{1}{c^2} (\dot{\mathbf{r}}_B^C \cdot \mathbf{r}_E^B) + \frac{1}{c^2} (\dot{\mathbf{r}}_E^C \cdot \mathbf{r}_A^E) + \\ & + \frac{\mu_J e_J}{c^2 \dot{s}_J} \sin E_J + \frac{\mu_{SA} e_{SA}}{c^2 \dot{s}_{SA}} \sin E_{SA} + \frac{1}{c^2} (\dot{\mathbf{r}}_S^C \cdot \mathbf{r}_B^S). \end{aligned}$$

关于这个公式的具体含义，读者可以参看原论文。

由于 TDT 与 TDB 的定义不够严谨，在使用上有诸多不便之处，1991 年，利用广义相对论，IAU 定义了地心坐标时（Geocentric Coordinate Time, TCG）和质心坐标时（Barycentric Coordinate Time, TCB）。二者选用的参考系分别是地球质心和太阳系质心。TCG 和 TCB 并不常用，在星历表上很少看到以 TCG 或 TCB 标记的时间。

同时，IAU 重新定义了 TDT，并将其改名为**地球时**（Terrestrial Time, TT）。TT 与 TDB 在 1970 年 1 月 1 日 00:00 重合，走时速率相差常数 L_g 倍，二者通过下式换算：

$$TT = \text{TCG} - L_g \times (\text{JD}_{\text{TCG}} - 2\,443\,144.500\,372\,5) \times 86400$$

其中 $L_g = 6.969\,290\,134 \times 10^{-10}$ ， JD_{TCG} 是 TCG 时标的儒略日数。同样地，TCB 与 TDB 之间也只有走时速率的差距。

实际应用中，TT 的时间由原子钟给出，TT 的走时速率与原子时是一致的，这是因为 TT 是 TDT 的延续，而 TDT 是 ET（历书时）的延续，原子时的秒又是根据 ET 定义的。因此有如下关系：

$$TT = TDT = ET = TAI + 32.184 \text{ s}.$$

^⑮ Moyer T D. Transformation from proper time on Earth to coordinate time in solar system barycentric space-time frame of reference[J]. Celestial Mechanics, 1981, 23(1): 33-56.

如果你没有看懂前面一堆诸如“广义相对论”之类的内容，也没有关系。作为一般的天文爱好者，只需要知道 TT 比 TAI 恰好快 32.184s 就足够了。

图 2.5 展示了本章所提到的几种时标的关系。这张图选自一篇 1992 年的论文^{①⑥}。

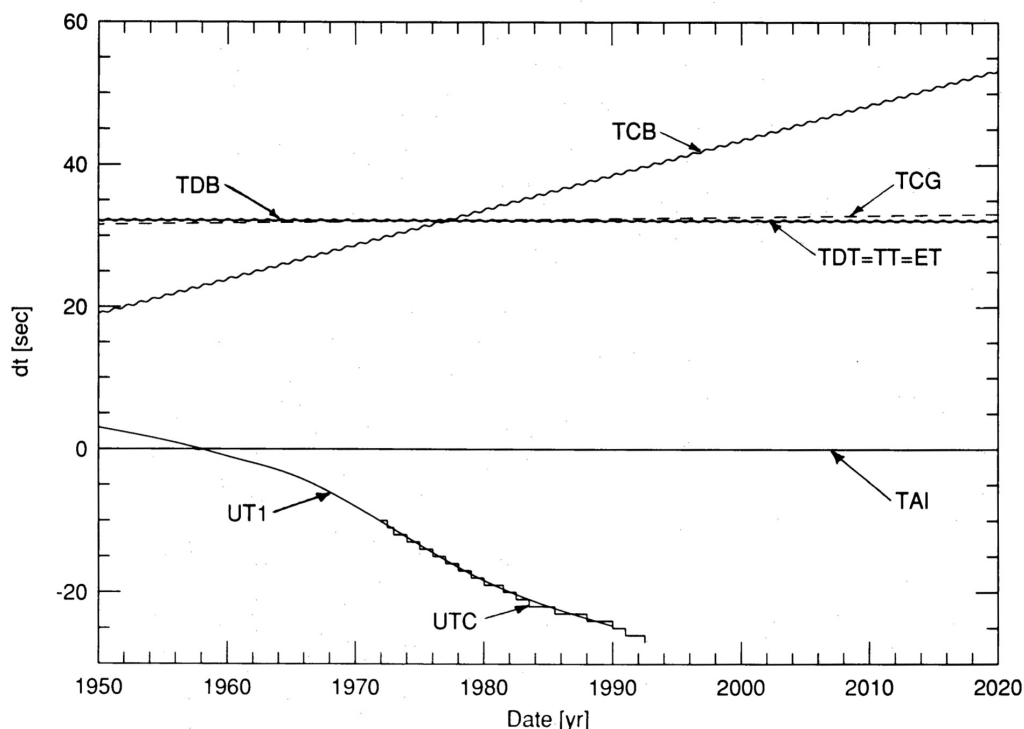


图 2.5 1950—2000 年间各种时标的关系。为了能看得更清楚，TCB 和 TDT 之间的周期项被放大了 100 倍。以 TAI 为参考，ET、TDT 和 TT 都等于 $32.184\text{s} + \text{TAI}$

关于儒略日的起算点

儒略日的起算点是儒略历公元前 4713 年 1 月 1 日正午 12 时。读者也许会有两个疑惑：① 为什么是正午 12 时，而不是 0 时？② 为什么选在公元前 4713 年？

计时起点选在正午，是因为在几百年前，正午是天文日的开始。之所以选择正午为开始，是因为正午，即太阳上中天的时刻在一年之中是固定的。如果选用日出或日落的话，由于黄赤交角造成的太阳直射点周年变化，日出和日落的时间并不是确定的。而不像现在一样选用午夜，则是囿于古代计时水平的限制：古代晚上多使用漏壶等工具计时，并不能精确确定午夜的时间。所以儒略日的起点选取了正午这个时刻。

^{①⑥} Seidelmann P K, Fukushima T. Why new time scales?[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1992, 265: 833-838.

为什么选定公元前 4713 年 1 月 1 日为儒略日的计时起点呢？这是因为：① 公元前 4713 年在当时所有已知的历史事件之前；② 公元前 4713 年是儒略周期的起点。那么问题来了：儒略周期是什么呢？

儒略周期的制定与西方文化中的三个历法周期有关：太阳循环（solar cycle）、默冬章（Metonic cycle）和罗马征税周期（indiction），它们的长度分别是 28 年、19 年与 15 年。儒略周期开始的年份是这三个周期同时开始的年份，儒略周期的长度是这三个周期长度的最小公倍数，即 $28 \times 19 \times 15 = 7980$ 年。

太阳循环指的是儒略历中每日对应的星期完全重合的循环周期。由于每四年才有一个闰年，而且闰年可能开始于一星期中的任意一天，即有 7 种不同情况，所以每过 28 年儒略历的星期会完全重合。西方人使用主日字母（dominical letter）来表示该年的星期情况。对于平年，使用一个字母表示该年第几天是第一个星期日。例如，公元 2021 年的第一个星期日是 1 月 3 日，写成主日字母就是 C。对于闰年，使用两个字母表示该年的星期情况，第一个字母对应 1 月和 2 月，第二个字母对应 3 至 12 月。例如，2020 年的第一个星期日是 1 月 5 日，所以第一个字母是 E；其 3 至 12 月与 2015 年（主日字母是 D）相同，故第二个主日字母是 D；即 2020 年的主日字母是 ED。在儒略历和公元纪年中，年份除以 28 的余数与主日字母的对应关系如下表所示：

表 2.2 年份除以 28 的余数与主日字母的关系

余数	主日字母	余数	主日字母
0	DC	14	G
1	B	15	F
2	A	16	ED
3	G	17	C
4	FE	18	B
5	D	19	A
6	C	20	GF
7	B	21	E
8	AG	22	D
9	F	23	C
10	E	24	BA
11	D	25	G
12	CB	26	F
13	A	27	E

每个太阳循环的最后一年主日字母为 A。据此推算，太阳循环开始的年份 y 应满足 y 除以 28 的余数为 20，写成数学表达式即是 $y \equiv 20 \pmod{28}$ 。

默冬章的含义与农历中的章差不多，都是因为 19 个回归年约等于 $19 \times 12 + 7 =$

235 个朔望月，其名字来源于发现这个关系的希腊天文学家默冬（Meton）。西方人古代就使用这个周期来计算月相，从而推断复活节的日期。1 月 1 日是朔日的年份为默冬章开始的年份。

当然，19 年 7 闰的算法是有误差的，长期使用就会导致与月相不符。所以也用数学的手段来计算默冬章。定义每个年份的**黄金数**（golden number）为该年除以 19 的余数加 1。于是默冬章的循环也就是黄金数的循环，黄金数为 1 的年份就是该循环的开始年份。如果该年份用 y 表示，那么就有 $y \equiv 0 \pmod{19}$ 。

罗马征税周期是 15 年，一般认为开始于公元 313 年或 298 年。对于年份 y ，其在征税周期中的年份数为 $(y + 2) \bmod 15 + 1$ ，所以对征税周期的第一年 y 有 $y \equiv 13 \pmod{15}$ 。

结合以上三个循环，设儒略循环开始的年份为 y ，则可以列出同余方程组

$$\begin{cases} y \equiv 20 \pmod{28}, \\ y \equiv 0 \pmod{19}, \\ y \equiv 13 \pmod{15}. \end{cases}$$

解这个同余方程组得 $y = 7980k - 4712$ ， k 为任意整数。因此，斯卡利杰选取了 -4712 年（公元前 4713 年）作为儒略日的计时起点。

简仪

从汉到唐，浑仪的环数逐渐增多，结构也越来越复杂。在使用时，由于环规互相遮掩，使得视野受阻。郭守敬在制定《授时历》时，被浑仪的缺点所困扰，于是下定决心彻底改进浑仪，在公元 1276 年铸制了简仪。简仪去掉了浑仪的黄道圈，将浑仪简化分解成两种独立的仪器，即赤道经纬仪和地平经纬仪，彻底克服了浑仪的缺点。由于郭守敬制造的简仪已于清代被熔掉，如今唯一一台简仪为明代正统年间的仿制品，现存于南京紫金山天文台。图 2.6 中的简仪为北京古观象台于新中国成立后的仿制品。



图 2.6 简仪实物图

相较浑仪，简仪的原理就直观了许多，如图 2.7 所示。其中阴纬环、立运环用来

测量地平坐标，四游环与赤道环用来测量赤道坐标。规环上安放的定极环用于校准极轴的高度。在百刻环上，以回归年与时辰划分刻度。窥衡上，郭守敬在两端安放了十字丝，这是后世望远镜中十字丝的鼻祖。为了减少摩擦，郭守敬在赤道环与百刻环的接触面之间放了四个小圆柱体，使得两环的滑动摩擦变为滚动摩擦，堪比于与现在的滚珠轴承结构。元简仪后方还设有正方案，利用日影来校准仪器的南北方向，明朝仿制的简仪将其改为了日晷。

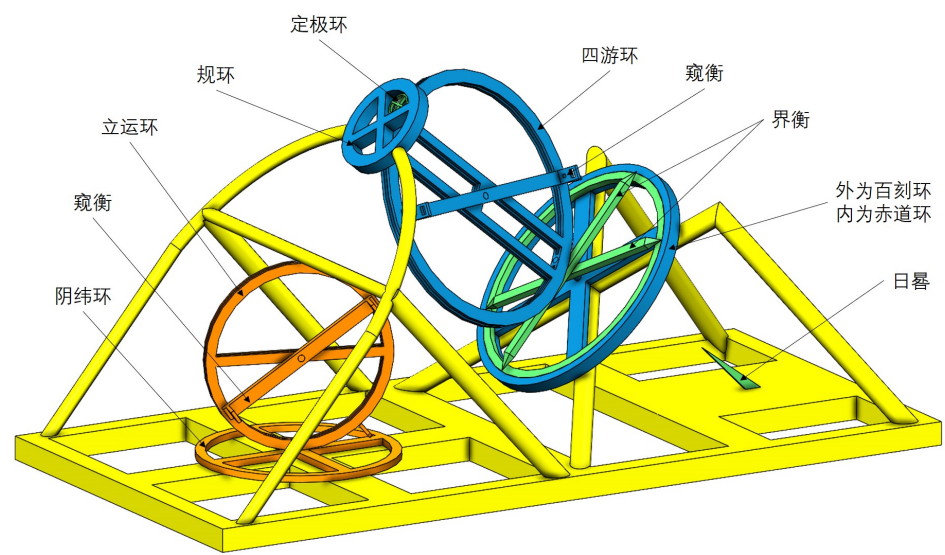


图 2.7 简仪原理图

清代天文仪器简介

1669—1674 年间，为了制定新历法，时任钦天监南怀仁年主持铸造了六台新的天文仪器。这些天文仪器仿照同时期第谷使用的天文仪器建造，分别为：天体仪（即浑象）、赤道经纬仪、黄道经纬仪、地平经仪、象限仪、纪限仪（图 2.8）。由于地平坐标分开测量导致了测量误差增大，于是在 1715 年，德国传教士纪里安铸造了地平经纬仪，将地平坐标的两个角度同时测量。1744 年，乾隆考察古观象台，发现所有仪器均为西洋样式，于是下令铸造玑衡抚辰仪。至此，清代的八台大型天文仪器均铸造完成。由于这些仪器的原理大都比较直观，故书只介绍纪限仪的原理。

纪限仪，即六分仪，如图 2.9 所示，仿照第谷所用六分仪制成，其结构如图 2.10 所示。可以看出，纪限仪主要由两部分构成，枢轴系统（绿色）和弧系统（蓝色），分别和所示。

枢轴系统（如图 2.11）为纪限仪的测量弧提供了三个旋转自由度。C、B、A 相

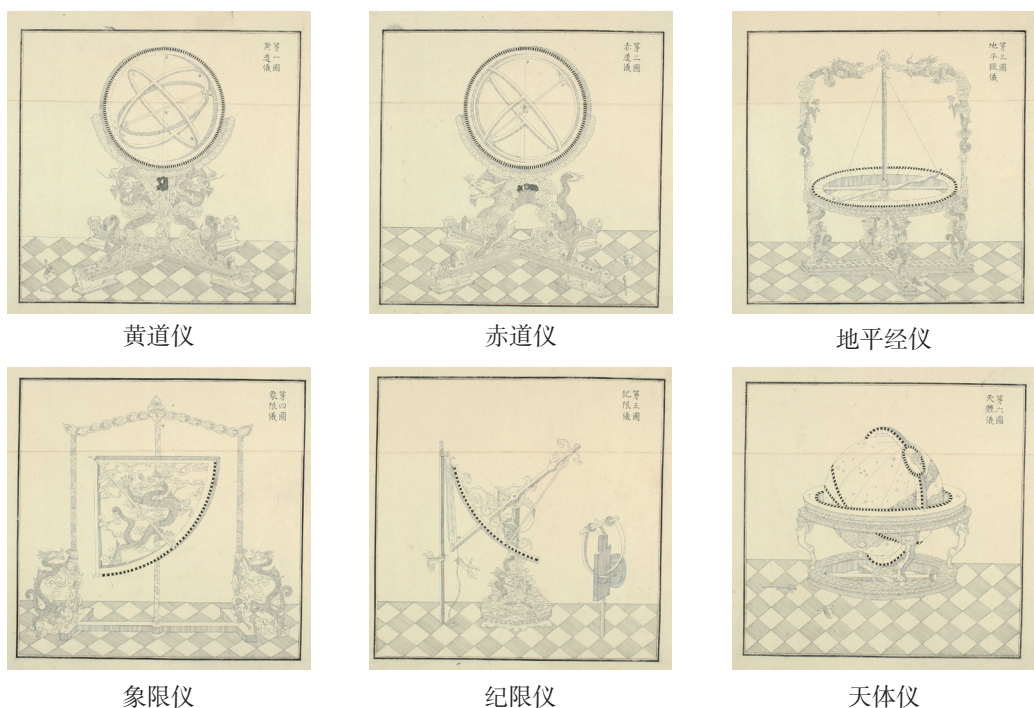


图 2.8 北京古观象台的天体仪（即浑象）、赤道经纬仪、黄道经纬仪、地平经仪、象限仪、纪限仪，图片选自南怀仁《新制灵台仪象图》。



图 2.9 纪限仪实物图

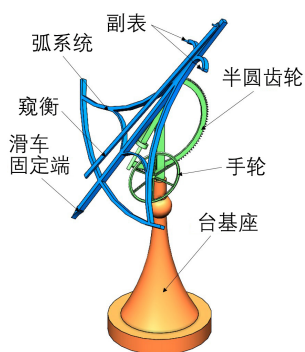


图 2.10 纪限仪原理图

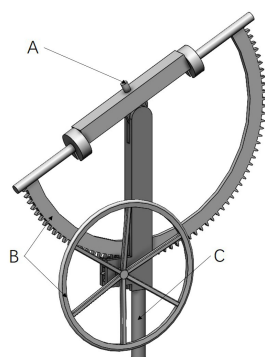


图 2.11 纪限仪枢轴系统

当于欧拉角的 φ 、 θ 、 ψ ，正好对应于刚体的三个转动自由度。这样弧就可以指向天空的任意方向，经过天球上的任意两颗星。在实际操作中，由于轴 A 倾斜，且仪器沉重，故实际上整个弧面是依靠一个滑轮组（即滑车）吊起来的，即弧系统的 E（滑车的示意图可见南怀仁所绘概念图）。

弧系统（如图 2.12）是纪限仪的测量部分，该部分的使用原理如下：图中可见，纪限仪有两个副表 A、C。将其中一个副表（比如 A）和轴 B 对准目标星 1，再旋转窥衡 D，使得 D、B、目标星 2 三点共线。此时窥衡读数 α 即为两颗星的角距离。

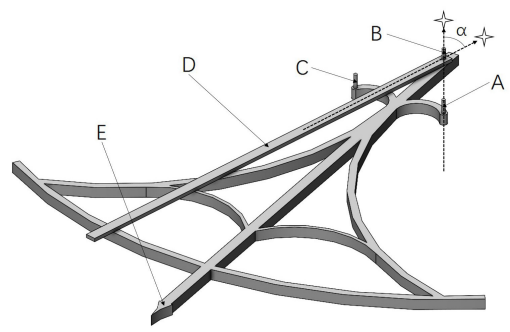


图 2.12 纪限仪的弧与窥衡

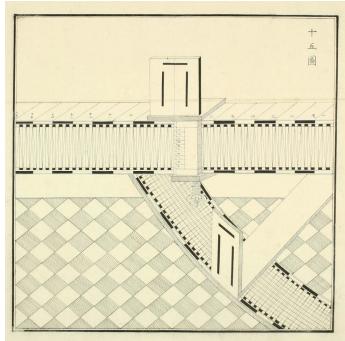


图 2.13 纪限仪的刻度

由于铸造水平限制，仪器精度原本只能在 $10'$ 。为了进一步提升精度，南怀仁在每一度中刻上斜线（如图 2.13 所示），并利用几条弧将弧面五等分，这样读数精度即可达到了。用类似方法在窥衡尽头的游表上继续划分可以进一步提升精度。南怀仁在《新制灵台仪象志》中称精度可达到 $6''$ ，而他在另一本书《欧洲天文学》中则称精度是 $15''$ ，可惜的是纪限仪曾被德国劫走，1921 年归还时遗失了原配的游表和窥衡，因此具体精度是多少也就不得而知了。

第三章 天文望远镜

① 望远镜的原理和分类

1609年，意大利物理学家伽利略第一次将望远镜指向夜空，这是人们用望远镜观察宇宙的开端。时至今日，望远镜的口径越来越大，构造越来越复杂。尽管如此，天文望远镜最主要的功能并没有变，那就是：探测暗弱的目标、分辨微小的细节。比如说，望远镜可以让我们看到很多肉眼看不到的暗星，也可以让我们看到木星的卫星、土星的光环等肉眼难以分辨的细节。

天文望远镜一般由**物镜**和**目镜**组成^①。物镜，顾名思义，朝向被观察的物体，而目镜则朝向使用者的眼睛。天体先由物镜成一个倒立的实像，再由目镜充当“放大镜”把这个实像放大。根据光路的不同（主要是物镜的不同），天文望远镜大致可以分为三类：**折射式望远镜**、**反射式望远镜**和**折反射式望远镜**。

● 折射式望远镜

折射式望远镜是最早发明的望远镜，也是最符合大众印象的望远镜。伽利略使用一块凸透镜为物镜，一块凹透镜为目镜，组合成望远镜。这种结构称为伽利略式望远镜。1611年，开普勒对其进行了改进，使用凸透镜作为目镜，可以获得较大视野和更高倍率。现代折射望远镜几乎都是基于开普勒结构的改进。

目前市面上廉价天文望远镜通常使用折射式结构。这种望远镜一般是利用两块色差相反的镜片组合（如冕牌玻璃凸透镜和火石玻璃凹透镜组合），仅对红蓝光进行了色差矫正，通常称作消色差物镜。其结构来源于1733年的英国律师切斯特·霍尔的设计。虽然以现在的眼光来看，这种望远镜通常色差严重，成像差劲，但依旧比伽利略时代进步太多，足以看到月球的环形山、木星的卫星、土星的光环和金星的相位。

经过400多年的发展，折射望远镜已经成为最成熟的结构。光学家对其投入大量精力，随着萤石玻璃、稀土元素玻璃、ED超低色散玻璃的使用，折射式望远镜成

^① 本章望远镜均指光学望远镜，不涉及射电望远镜相关内容。

像效果趋于完美。其中，复消色差物镜（apochromatic lens, APO），通过增加镜片数量、采用特殊材料制作镜片，可以对红绿蓝三色色差进行矫正。一台精心设计的折射望远镜成像平坦，边缘锐利，色差矫正完美，效果令人震撼，通常价格也令人震撼（如图 3.2）。

在观测中，你永远可以相信一台折射式望远镜，不需要关心光轴偏离，不需要担心镀膜变暗，拿起来就能用。

但是，现在的专业天文观测站已经很少使用折射式望远镜了。折射望远镜镜片多、镜片厚度大，大口径的折射望远镜自重太大，往往会因重力而变形，而且难以操作。这么多镜片之间必须精密配合，制造难度随着口径增大也急剧提高。最重要的是，即使使用了复消色差技术，非可见光波段的色差依然无法消除，对于需要进行多波段观测的现代天文学来说，这是不可接受的弊端。



图 3.1 一种折射式望远镜

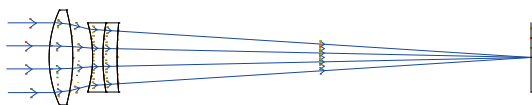


图 3.2 一种采用复消色差结构的折射式望远镜光学原理。其使用了三片透镜和高级玻璃（首片为低色散玻璃，后两片为火石玻璃）

反射式望远镜

常见的反射式望远镜系统通常为**牛顿式**或**卡塞格林式**。通过凹面镜作为主镜汇聚光线成像，避免了使用透镜带来的色差。

当同时代的科学家在通过无限拉伸望远镜的长度来减少色差的时候，牛顿认为折射式望远镜的色差是无法消除的。所以他将一块 2.5 cm 的铜锡砷合金打磨成球面，并用一块平面镜至于焦点前，将焦点引出镜筒，于 1668 年成功制作出第一台反射式望远镜，称为**牛顿式望远镜**，这种结构是最常见的反射式望远镜。1672 年，由卡塞格林发表了一种主镜为抛物面镜，副镜为双曲面镜的结构，这种结构将光路折叠起来，结构非常紧凑。



图 3.3 一种牛顿式反射望远镜

值得注意的是，牛顿并不是第一位设计出反射式望远镜的人，格里高利于 1663 年在光学进展（*Optica Promota*）上发表了利用两个凹面镜在主镜后成正像的光学系统。该设计主镜为抛物面镜，副镜放在焦点后，为凹椭球镜，这种结构被称为格里高利式。由于该设计所有面都是非球面，格里高利并没有强大的动手能力，制作出的望远镜无法使用，直到 10 年后，该结构才由胡克制作成功。

现代的牛顿式反射镜使用抛物面镜作为主镜，平行光将汇到焦点上，避免了球面镜导致光线不能汇聚成一点造成的球差（如图 3.4）。但是偏离轴心位置的星星会变成彗星一样的形状，称为彗差。

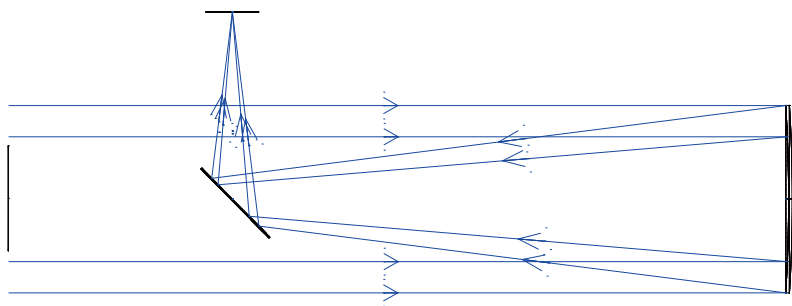


图 3.4 牛顿式反射镜光学原理。其主镜为抛物面镜，可以很好地将光线汇聚到一点

反射式望远镜使用镜面成像，光线不通过透镜，所以也不需要特别的玻璃。口径相同的情况下，牛顿式望远镜价格更便宜。由于反射镜面精度会严重影响成像，镜面加工精度是评价反射式望远镜的重要指标之一。现代的牛顿反射镜不再使用沉重的金属为主镜，而是使用玻璃镀铝作为主镜。由于反射镜需要副镜，被搬运后都需要**调整光轴**，操作起来比较麻烦。

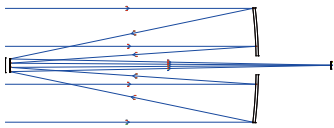


图 3.5 哈勃望远镜的光学原理。采用了卡塞格林式反射镜

几乎所有大型研究级望远镜都是反射镜，比如著名的哈勃望远镜就采用了卡塞格林式反射望远镜（如图 3.5）。其中的原因，主要还是反射镜相对于折射镜的几个关键优点：无色差、成本低、口径能够更大。

廉价的反射镜会使用球面镜，虽然没有色差，但是加工精度低，像差严重，某些型号甚至无法对焦，体验远低于低端折射镜。在经济条件允许情况下，请尽量选择抛物面反射镜。

折反射式望远镜

折反射式望远镜结合了反射镜和折射镜的优点，在系统中同时使用了反射镜和透镜。主镜通常采用球面镜避免彗差，在主镜前使用改正透镜修正球差。常见的折反射望远镜有两种，**施密特式**和**马克苏托夫式**。

施密特为了巡天，于 1930 年发明了施密特式摄星镜，以球面镜为主镜，在镜头前使用一块中间凸两边凹的修正透镜（四次曲面）矫正球差。特点是视场广，成像亮。由于其焦平面曲率大，拍摄时在焦平面处需要使用弯曲的底片。施密特式摄星镜的原始结构无法用于目视，但通过与其他反射结构结合就可以目视，最常见的结构是施密特-卡塞格林式，简称**施卡**（图 3.6）。施卡的改正镜很薄，重量较轻，通常在改正镜中间打孔来固定副镜。



图 3.6 一种施密特-卡塞格林式望远镜

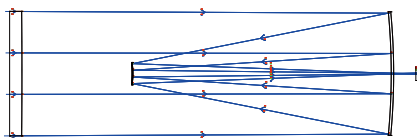


图 3.7 施密特-卡塞格林式望远镜。图中前端为施密特改正镜

苏联的光学家马克苏托夫采用另一种方式，他以毒攻毒，在球面主镜前放置一块厚的弯月形透镜来改进球差。马克苏托夫望远镜的特点是所有光学面都是球面，这对加工来说十分方便。原始的马克苏托夫望远镜也无法直接用于目视，需要结合反射式望远镜结构，最常见的结构是马克苏托夫-卡塞格林式，简称**马卡**（图 3.8）。由于弯月镜十分厚重，镜片通常不会打孔而是在中心镀铝取代副镜。



图 3.8 一种马克苏托夫-卡塞格林式望远镜

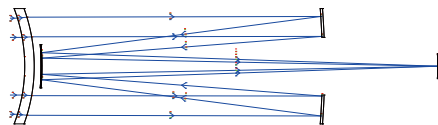


图 3.9 马克苏托夫-卡塞格林式望远镜。其中最前端为弯月镜

折反射望远镜价格曾经十分高昂，但是随着国产厂商进入市场，现在折反射望远镜价格已经大大下降。仍有一些厂家在制作高精度折反镜，通过高精度加工镜面并在

镜筒内安装高精度光阑，使得成像素质十分优异，价格十分昂贵。

折反望远镜为了目视可以结合卡塞格林式，当然也可结合牛顿式，分为两种，施密特-牛顿望远镜（施牛）和马克苏托夫-牛顿望远镜（马牛）。使用牛顿式结构避免了焦比大的缺点，但是市面上较少见到，部分国产厂家有马牛在售，价格十分昂贵。

请不要轻易调整折反望远镜的光轴，因为你肯定不会想调第二次。

■ 望远镜的参数

■ 物镜口径（ D ）

望远镜物镜口径通常简称为口径，即未被镜框遮挡部分的物镜直径，常以毫米为单位。口径无疑是评价望远镜**最重要的参数**。望远镜口径的大小直接决定望远镜的集光力与分辨率。对于望远镜口径的分类并没有明确定义，对爱好者来说，100 mm 以下口径为小型望远镜，100 ~ 250 mm 口径为中型望远镜，250 mm 以上为大型望远镜。

■ 焦距与焦比

焦距是主镜中心到焦点的距离。焦距是望远镜系统的重要参数，望远镜放大倍率即为物镜焦距除以目镜焦距。焦距直接决定望远镜配上相同目镜的放大倍率和视野大小。望远镜的焦比是焦距与物镜口径的比值，以 F 值表示（此即摄影镜头光圈），因此口径不变的情况下焦比低的倍率更低、视野更大。同时低焦比的像差更难消除，所以在选购低端望远镜时注意不要购买低焦比的类型。

■ 视场和放大倍率

视场指望远镜能看到的图像的宽度。望远镜有**表观视场**和**实际视场**之分。表观视场就是望远镜成的像相对于人眼的张角，单位是度（°），表观视场越大，我们感觉看到的图像越宽广。表观视场由目镜决定。

实际视场则是望远镜成的像对应的物相对于人眼的张角。单位也是度（°）。实际视场越大，我们实际看到的天区范围越大。实际视场由目镜和物镜共同决定。天文望远镜的倍率等于物镜焦距与目镜焦距之比。视场与倍率之间有着简单的三角函数关系

$$\tan \omega' = \Gamma \times \tan \omega,$$

其中表观视场为 $2\omega'$ ，实际视场为 2ω ，放大倍率为 Γ ^②。

② 表观视场与实际视场之比是角放大倍率，不是我们常用的“倍率”

■ 望远镜分辨率

望远镜分辨率是比倍率重要得多的参数。在忽略大气抖动等的理想情况下，望远镜分辨率遵循瑞利判据，对于一个圆形体系，其分辨率公式为：

$$\delta = \frac{1.22\lambda}{D},$$

其中 D 为望远镜物镜口径， λ 为光线波长， D 和 λ 应该取相同的单位； δ 为角分辨率，单位为弧度。由此可见口径越大望远镜极限分辨率越高。虽然望远镜放大倍率可以强行提高，但是超过分辨率之后，虽然能让你看得更“大”，却不能让你看得更“清楚”，所以一个民间算法为：有效放大倍率 = $D \times 2$ ，其中 D 为望远镜物镜口径，单位为 mm。同时反射式望远镜的副镜结构虽然影响集光力，但理论上并不影响分辨率。

■ 集光力

天文望远镜除了能让我们看得更清晰，另一个重要目标是看到更暗的天体。人眼在黑暗中瞳孔只能扩大到 7 mm，而望远镜利用物镜收集光线，并且“汇聚”到人眼中。集光力与物镜面积有关，简单的计算方法为：

$$A = \frac{D^2}{7^2},$$

其中 A 为集光力， D 为物镜口径，单位为 mm。需要提到的一点是，有副镜结构的望远镜会产生中心遮挡，影响集光力。所以相同口径下，折射式望远镜的集光力会更强。

■ 出瞳距离

出瞳距离指目镜到眼睛最适合观测位置的距离。眼睛与目镜的距离低于或者高于这个数值都会造成观测不适。这个参数越大越好，主要影响观测舒适度，如果出瞳距离太低，眼睛和目镜贴得太近，有可能被眼睫毛影响观测，如果观测者是戴眼镜观测，就更需要较大的出瞳距离。

最后，当你打算花大价钱购买一台望远镜时，不要忘了，市场上见的望远镜都是供爱好者使用，基本无法用于科研。现代天文学已经进入光谱研究中，对于科研人员来说，口径小于一米的望远镜无异于玩具。但是也不要过度低估手上的望远镜，伽利略正是用 30 mm 的单片凸透镜发现了木星的卫星，为日心说提供了有力证明，成为现代科学之父。

2 支架

为了稳定望远镜并让它能够指向天空中的任意位置，我们需要为天文望远镜选择一个支架。目前天文望远镜的支架主要有**地平式**和**赤道式**两种。地平式支架结构比较简单，它是根据地平坐标系制作的。如图 3.10 所示，它有两个轴，一个调整望远镜方位角，另一个调整望远镜高度角，通过转动这两个轴，就能让望远镜指向天空中的任意位置。地平式支架的种类很多，业余天文望远镜市场中的“经纬台”和“道布森支架”就属于地平式支架，其中道布森支架因为重心较低，可以更方便地支撑重量更大的望远镜，很受天文爱好者的青睐。

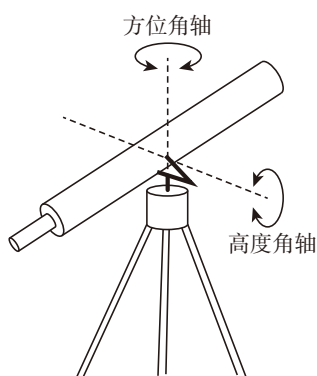


图 3.10 地平式支架的原理



图 3.11 经纬台



图 3.12 道布森支架和望远镜

赤道式支架也叫**赤道仪**，结构比地平式支架稍微复杂一些。赤道仪是根据地球上的赤道坐标系制作的，如图 3.13 所示，它也有两个轴，一个是赤经轴（或者叫极轴），另一个是赤纬轴。使用时，将极轴的方向对准北天极，赤道式支架上的赤经、赤纬坐标就和天球赤道坐标系上的赤经、赤纬坐标相符合，转动这两个轴，就能让望远镜指向天空中的任意位置。赤道式支架的种类也很多，天文爱好者最常用的是**德国式赤道仪**和**中心平衡式赤道仪**（因为最早是一家中国公司制造的，也被该公司称为**中国式赤道仪**）。这两种赤道仪因为望远镜重心偏离赤经轴，需要加入**重锤**来平衡望远镜。

地平式支架的优点是简单和轻便。因为我们对方位角和高度角这样的地平坐标体系（也就是上下左右）较为熟悉，使用地平式支架调整望远镜指向寻找目标天体非常方便；另外相比于赤道式支架，它不需要重锤，重量轻很多，因此它常常在入门产品中被使用。地平式支架的缺点是不便于跟踪和摄影。

地平坐标系是不变的，而由于地球自转，天体在地平坐标系中的位置会变动，因此天体的方位角和高度角的变化率需要得知当前时间才能计算得到，只有较高级的计算机化的地平式支架才会配备跟踪装置，入门级别的地平式支架几乎都是手动的。

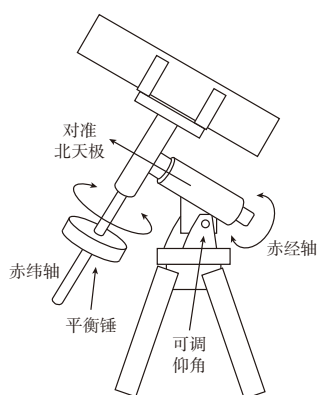


图 3.13 赤道仪原理



图 3.14 德式赤道仪



图 3.15 中央平衡式赤道仪

并且，由于地平坐标系和赤道坐标系存在夹角，使用地平式支架的望远镜的成像会引入场旋（观测时成像绕视场中心转动），因此业余的地平式支架并不适合长时间曝光摄影，只能进行短时间曝光摄影。有些地平式支架还有另一个问题：因为望远镜会撞到支架上，无法将望远镜指向天顶，即使不会撞到支架，在自动跟踪时，如果目标在天顶附近，方位角的跟踪速度将接近无穷大，这意味着在靠近天顶的一个小天区内地平式支架无法正常跟踪。

赤道式支架的优缺点则与地平式支架相反。由于地球自转，日月星辰东升西落，赤道坐标系相对于观测者是变动的，天球赤经轴绕着北天极转动。但天体在赤道坐标系中的位置是不变的。如果让赤道仪的赤经轴按照地球自转的角速度旋转，与天球赤经轴的转动一致，那么，就可以抵消地球自转的影响，很方便地进行跟踪观测。赤道式支架的跟踪只需要按照地球自转角速度转动赤经轴即可，不需要像地平式支架那样通过计算机计算，因此许多入门级赤道式支架只需要加装一个转速合适的电机，就可以进行跟踪观测。并且由于赤道式支架与赤道坐标系相契合，并不会产生场旋，是热衷摄影的天文爱好者的首选。但是赤道坐标系和我们平时生活中所熟悉的上下左右较为脱节，熟悉赤道式支架的使用需要一定时间。并且由于需要使用重锤，赤道式支架比较笨重。

实际上，根据地平坐标系和赤道坐标系之间的关系，两种支架可以互相转化。只需要将赤道式支架的极轴高度角调整为 90° ，赤经轴变为方位角轴，赤纬轴变为高度角轴，它就变成了地平式支架。同样，地平式支架可以反其道而行之，加入一个角度为 $(90^\circ - \text{极轴高度角})$ 的楔架，就变成了赤道式支架。现在，已经有同时拥有地平式和赤道式两种工作模式的支架上市（如图 3.16）。

在过去，因为赤道式支架的跟踪和摄影优势，专业的天文观测站里的望远镜使用



图 3.16 同时拥有地平式和赤道式两种工作模式的 Sky-Watcher AZ-EQ6 支架

的也都是赤道式支架。但随着望远镜越造越大，相应的赤道式支架重量过于巨大，现在的天文观测站已经改用地平式支架。那么如何解决场旋问题呢？科研工作者们在目镜或者传感器上加装了一个**消旋器**，通过计算场旋的速率，让消旋器以场旋速率转动，抵消场旋。

③ 天文望远镜的配件

目镜

如果想要进行目视观测，目镜是必不可少的配件。

望远镜的放大倍率等于物镜焦距与目镜焦距之比。因此，对于同一台望远镜，其物镜焦距是固定的，长焦距的目镜放大倍率小，短焦距的目镜放大倍率大。通过配备不同的目镜，我们可以实现不同的放大倍率，适合观测不同的目标。例如，星云角直径较大，可以选用长焦距的目镜，用较小的倍率观测；行星角直径较小，可以选用短焦距的目镜，用较大的倍率观测。

目镜按照光学结构大体可以分为两类。一类是经典结构目镜（3.17(a)）。除去已经被淘汰，仅仅在廉价望远镜套装中出现的 H（惠更斯）、R（冉斯登）、K（凯尔纳）目镜，主要包括 PL（普罗素）和 OR（阿贝无畸变）目镜。它们的特点是表观视场（见**双筒望远镜**部分）较小，中心锐度高。但是，因为视场小，出瞳距离短，观测舒适度较低。另一类是广角目镜（3.17(b)），主要包括表观视场大于 60° 的一系列目镜。它们表观视场较大，中心锐度较低，边缘成像质量较差，但因为视场大，出瞳距离长，观测舒适度较高。

追求更高像质的天文爱好者会使用经典结构目镜观测，追求观测舒适度的天文



(a) 经典结构目镜



(b) 广角目镜

图 3.17 目镜

爱好者则会选择广角目镜观测。观测行星时锐度很重要，因此更推荐使用短焦距的经典结构目镜；观测深空天体时许多人喜欢掉进星海的感觉，因此更推荐使用长焦距的广角目镜。

另外还有一种变焦目镜，可以改变焦距，快速变倍，使用方便，但成像质量较差。

此外，望远镜的极限放大倍率有一个经验公式：以毫米计望远镜的口径数值 $\times 2$ 。例如 150 mm 口径的望远镜极限放大倍率大约为 300。超过这个倍率，成像也不会变得更清晰，失去观测价值。按照这个经验公式，我们在选配目镜时，不要选择焦距小于物镜焦距 $/2$ 的目镜^③。而且由于大气湍流的影响，超过一定放大倍率，成像会很不稳定，在实际观测中，需要根据大气条件选择合适的目镜。另外由于人眼瞳孔大小极限的限制，不要选择目镜焦距/物镜焦距大于 8 的目镜^④。

天顶镜

天顶镜有两个用途。第一，将望远镜的出射光路偏转，改变观测姿势，使得我们能够以一个更舒服的姿势观测。第二，将望远镜成的倒像改变为正像。

天顶镜有两种，分别对应这两个用途。一种是普通天顶镜，使用平面镜或者全反射棱镜将光路偏转 90° ，使得我们在观看天顶附近的天体时改变姿势，可以平视，不需要仰着脑袋，这也是天顶镜名称的由来。经过一次反射之后，它会将原本的图像上下颠倒。另一种是全正像天顶镜，使用全反射棱镜将原本的图像上下左右都颠倒，并使得光路偏转 45° （或 90° ）。这种天顶镜主要应用于观看地面景物。

一些牛顿反射式望远镜可以通过松开抱箍并旋转镜筒，改变目镜端的朝向，不需

③ 这是因为，当放大倍率为物镜口径的 2 倍时，目镜焦距 = 物镜焦距 / 放大倍率 = 物镜口径 \times 物镜焦距 / 放大倍率 = 物镜焦距 $/2$ 。

④ 为了不浪费光线，出瞳直径不宜大于 8mm，此时放大倍率 = 物镜口径 $/8$ ，又因为放大倍率 = 物镜焦距 / 目镜焦距，物镜口径 = 物镜焦距 / 物镜焦距，则目镜焦距 / 物镜焦距 = 8。



图 3.18 普通天顶镜



图 3.19 全正像天顶镜

要加天顶镜。如果不需要观看地面景物，一般使用普通天顶镜即可。

使用天顶镜时必须注意，天顶镜会延长光路，可能会因为光路太长导致无法调焦至清晰。天顶镜会引入额外的光学介质，造成成像质量降低，摄影时不要使用天顶镜。

巴罗镜

巴罗镜就是增倍镜，其基本原理是一个凹透镜，可以延长物镜焦距，使得放大倍数增加。巴罗镜一般在观测行星等需要高倍率的情况下使用，观测深空天体时基本无需使用巴罗镜。巴罗镜会引入额外的光学介质，造成成像质量降低，在保证观测舒适度的前提下，尽量使用合适的目镜直接达到目标倍率。



图 3.20 巴罗镜

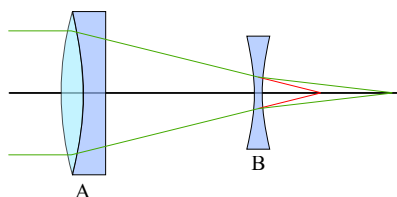


图 3.21 巴罗镜原理。其中 B 表示巴罗镜

巴德膜

需要再次强调的是，**绝对禁止在未安装减光装置时用肉眼直接观测太阳，否则会导致失明的严重后果！**

一种常用的观测太阳的减光装置是巴德膜，它是一种前置滤光片（图 3.22）。它其实是一种两面都镀了金属层的树脂膜，因为这种滤光片最早是由德国的巴德（Baader）公司制造而得名。它能滤除绝大部分太阳光线。太阳光线极强，直接使用望远镜观测太阳会导致失明，而在望远镜前端加上巴德膜



图 3.22 巴德膜

之后，可以用肉眼安全地观测太阳。

巴德膜一般有两种型号，5.0 型和 3.8 型。5.0 型减光为 10 的 5.0 次方倍，一般用于目视观测；3.8 型减光为 10 的 3.8 次方倍，一般用于摄影，因为减光较少，可能会伤害眼睛，不宜用于目视。

巴德膜减光大致是全波段的，通过巴德膜观测到的太阳绝大部分是光球层，我们可以使用巴德膜来观看太阳黑子。

如果没有日珥镜，观测太阳一定要使用巴德膜，并且在使用之前需要检查巴德膜是否有破损、漏光，如果有上述情况则必须更换。使用时需要检查巴德膜是否盖好，严防漏光。

市面上有一些安装在目镜上的太阳滤镜，绝对不可以使用，极易导致失明。因为这种后置滤镜没有阻止任何太阳光线进入望远镜光路，大量太阳光线仍将被望远镜汇聚，镜筒内温度急剧升高，目镜端接近焦点，温度更高，此种太阳滤镜很可能被汇聚的太阳光线炸裂，使眼睛失去保护，造成失明。^⑤

最后要提醒读者的是，如果我们想在日食等天象发生时用肉眼观测太阳，不能使用诸如 X 光片、电焊护目镜片等材料进行滤光，必须使用专用的日食眼镜或巴德膜等滤光片。这是因为 X 光片等材料虽然滤去了一部分可见光，让太阳不那么刺眼，但并不能滤去紫外等波段的太阳辐射，仍然会对眼睛造成伤害。

日珥镜

日珥镜可以用于观测太阳色球层以及色球层上的日珥（图 3.23）。因为太阳色球层光谱中，波长为 656.28 nm 的 H- α 谱线占绝对优势，故通过日珥镜滤出 H- α 谱线可观测色球层。本质上，日珥镜就是加入了滤光装置的折射式望远镜。这个滤光装置允许通过的谱线宽度（带宽）越窄，得到的色球层图像越纯粹，对比度越高。日珥镜的带宽至少要低于 1 埃（0.1 nm）。



图 3.23 日珥镜

如图 3.24，这个滤光装置包括前置减光滤镜及光学谐振腔和后置截止滤镜，光学谐振腔是这个装置的核心。首先减光滤镜滤去过多的阳光，随后光学谐振腔（法布里-珀罗干涉仪）通过干涉将光谱变成离散的周期性峰值，最后截止滤镜筛选出包含 H- α 谱线的部分。由此可见，日珥镜各个部分都很重要，不能随意拆除或移动，否则容易对视力造成损害。

^⑤ 有一些目镜端的配件经过设计，可以避免高温，安全使用，例如赫歇尔棱镜和目镜端日珥镜组件。

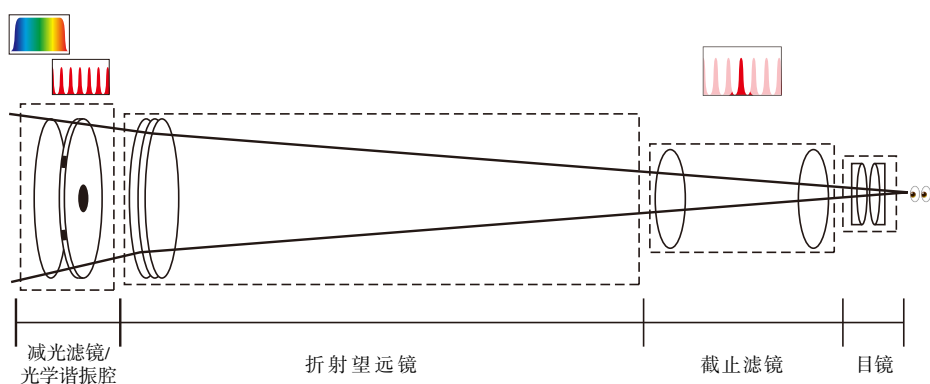


图 3.24 日珥镜原理

4 挑选合适的器材

工欲善其事，必先利其器。因为不同的望远镜参数不同，适合观测的目标也不同，挑选合适的器材，对于天文观测可以起到事半功倍的效果。

我们将挑选器材时需要权衡的事宜总结为四个问题：

1. 器材主要用途是目视还是摄影？

目视观测口径为王，口径越大，能看到的天体细节越多，也能看到更暗的目标，甚至能看到一些深空天体的颜色。如果主要进行目视观测，我们推荐在预算范围内、外出运输携带范围内口径最大的望远镜，例如特别强调目视观测的道布森式牛反望远镜。但如果主要想摄影，未必就需要太大的望远镜。

2. 主要观测目标是深空天体还是行星，或者都想涉猎？

简单来说，焦比短的望远镜更适合观测深空天体，焦比长的望远镜更适合观测行星。例如，短焦比（例如 F/4）的牛反是深空天体目视和摄影的常见器材，长焦比的马卡、施卡是行星目视和摄影的常见器材^⑥。

3. 您的预算有多少？

预算越多，就能买到更优质、更强大的器材。

4. 器材是否需要移动？

如果需要移动（外出观测等），您的运输携带能力（是否有车，后备箱的尺寸等问题）决定了您的器材最大的尺寸。如果不需要移动（阳台、小区观测，远程天文台等），就不太需要考虑运输问题。

图 3.25 是一个帮助挑选合适的器材的流程图，可供参考。

^⑥ 可以认为目视时的目标亮度仅与口径有关，同口径下短焦比的望远镜不会让视场中的目标变得更亮。但是，焦比会影响目镜的选择，例如观测行星，同样口径的长焦比施卡和短焦比牛反，放大到同样倍率，施卡可以选择舒适度高的长焦目镜，还可以省去巴罗镜。因此我们仍然建议目视观测者考虑焦比。

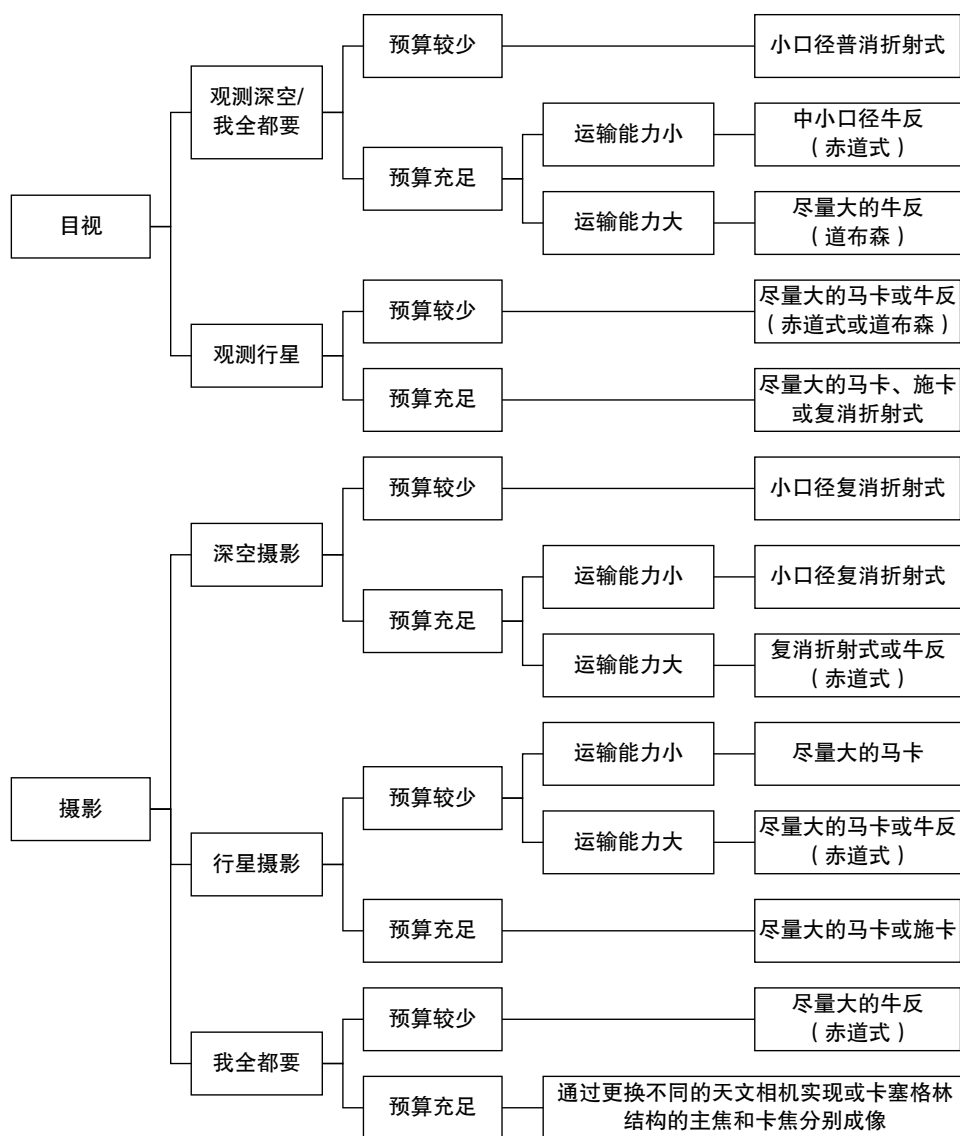


图 3.25 挑选望远镜流程图

除了选择合适的望远镜，选择合适的支架也十分重要，特别对于天文摄影，前面已经提到过不同支架的优缺点。

如果主要进行目视，可以选择轻便的手动地平式支架。需要使用高倍率观测行星时，可以选择有跟踪功能的支架。如果您观测的目标较为暗弱难以找到，可以选择带有自动寻找目标（GoTo）功能的支架；如果主要进行摄影，赤道仪几乎是必不可少的。深空摄影需要长时间曝光，对赤道仪要求较高，整套摄影设备（包括望远镜、相机和其他配件）重量不要超过赤道仪的标称载重的 75%，并且建议特别注意赤道仪的精度。行星摄影对赤道仪的要求稍低，而且自动跟踪的地平式支架也能够拍摄行星。

最后是选择合适的配件。精选 3 个左右的目镜和一个巴罗镜，可以实现很多不同的倍率。各种目镜、巴罗镜、天顶镜的优缺点已经在上文叙述过了。

5 双筒望远镜

在很多人的印象中，天文观测的设备就是单筒的天文望远镜。但实际上，双筒望远镜也是天文观测的一大利器。相较于天文望远镜，双筒望远镜有不少优势。

首先，天文望远镜较为笨重，而且常常需要组装。双筒望远镜则十分简单轻便，这意味着我们可以随时携带，随地观测，尤其适合观测新手。而在一些车辆难以到达的地区，唯有双筒望远镜始终能够陪伴我们领略星空的瑰丽。

其次，天文望远镜的放大倍率一般较大，双筒望远镜的放大倍率一般较小，普遍在 6 ~ 12 倍之间。对于某些观测目标，例如角直径较大的疏散星团、发射星云等，使用双筒望远镜更容易找到并进行观测。需要用天文望远镜指向某个目标时，也可以先使用双筒望远镜确定它在天空中的位置。还可以用双筒望远镜扫视银河或者其他感兴趣的天区，寻觅散落其间的深空天体；如果光污染较小，低倍率下的银河细节将让人叹为观止。

最后，双筒望远镜的价格较为便宜，对于想要超越肉眼体验星空，但又囊中羞涩的天文爱好者来说，无疑是最佳入门望远镜。

那么如何挑选第一台双筒望远镜呢？（在介绍这个问题之前，我们想提醒读者：电商所售的低于 200 元的双筒望远镜光学质量差，做工粗糙，只能进行勉强的天文观测，非常不推荐。）在这里，我们需要考虑两个主要问题。

第一个问题：屋脊棱镜还是保罗棱镜？双筒望远镜本质上是折射式望远镜，成倒像，为了让我们看到的图像正过来，双筒望远镜里需要加入正像棱镜。一部分望远镜使用保罗棱镜（因为发明人 Ignazio Porro 而得名），如图 3.26 所示，它们的样子其实就是很多人对双筒望远镜的第一印象。

另一部分望远镜使用屋脊棱镜（因为此类棱镜有两个面成 90° 角，类似屋脊而得



图 3.26 保罗双筒望远镜

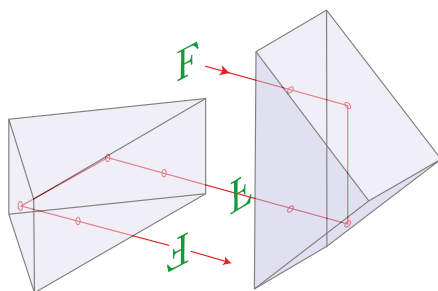


图 3.27 保罗双筒望远镜光学图

名,如图 3.28 所示)。屋脊棱镜其实有多种,使用最多的是施密特·别汉棱镜(图 3.29),其次是阿贝·柯尼希棱镜(图 3.30)。

保罗望远镜结构简单,造价便宜,在同价位,光学质量相比屋脊望远镜存在优势。缺点是较为笨重,并且如果制造成两个镜筒联合调焦(比较方便,是我们平时最常使用的调焦类型),望远镜很难进行防水设计。为了防水,只能两个镜筒分开调焦。对于天文用途,分开调焦是可以接受的,甚至调焦精度更高,高级保罗望远镜也常常设计成分开调焦。但是如果将这类望远镜用于其他用途,就需要权衡利弊。屋脊望远镜光学结构稍微复杂,更为小巧轻便,外观漂亮,而且通常能够防水,但是在价格方面有一定劣势。因为屋脊望远镜的许多优势点,各个光学厂家的高端产品线一般只有屋脊望远镜。我们认为,现在国产品牌同价位的保罗望远镜和屋脊望远镜的光学水平已经相差无几,结合我们的综合体验,更推荐屋脊望远镜。



图 3.28 屋脊双筒望远镜

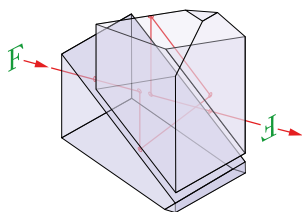


图 3.29 施密特·别汉棱镜光学图

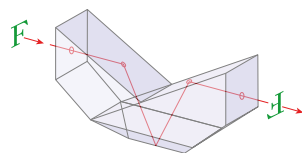


图 3.30 阿贝·柯尼希棱镜光学图

第二个问题：**口径和倍率如何选择**？双筒望远镜最常见的口径有 42 mm、50 mm 等，最常见的倍率有 7×、8×、10× 等。双筒望远镜的成像亮度，由口径和倍率共同影响。成像越亮，能够看到的暗弱恒星和深空天体越多，因此对于天文用途，我们喜欢更亮的双筒望远镜。这里有一个很重要的参数：**出瞳直径 = 口径 / 倍率**，而成像

亮度正比于出瞳直径的平方。结果非常明了：口径越大、倍率越低，双筒望远镜的成像亮度越高。所以我们通常会选择口径 42 mm 以上，倍率 10× 以下的双筒望远镜。

但是出瞳直径也不是越高越好。如果出瞳直径大于人眼的瞳孔直径，就会有一部分光线进入不了人眼，造成浪费。人眼在黑暗中瞳孔会张大，直径最大大约 7 mm，随着年龄增长，这个数值还会逐渐降低。所以，一般不会有出瞳直径 8 mm 以上的双筒望远镜，也就是说，当口径增大时，倍率通常会同步变高，不会有大口径低倍率的双筒望远镜（存在一些特殊例外，比如星座镜，主要因为用途不同）。天文用途的双筒望远镜出瞳直径最好大于 4 mm。另外，人眼在光线充足的情况下瞳孔会收缩，白天使用的双筒望远镜出瞳直径在 2.5 mm 以上即可。

出瞳直径是评判双筒望远镜成像亮度的普遍标准，但有些厂家和用户会引入“微光系数”（twilight factor）的概念，即 $\sqrt{\text{口径} \times \text{倍率}}$ 。这个概念已经过时且不合适，我们建议无需理会。除此之外还需要注意，口径越大，体积重量越大，越难以携带；倍率越大，手持使用时越容易受到身体的抖动影响（市面上有一种稳像双筒望远镜，可以防抖，实现手持高倍率）。我们最推荐的是两种经典搭配：8× / 42 mm 以及 10× / 50 mm。7× / 50 mm 对于追求稳定舒适的观测者也是很好的选择。读者可以根据自身需要选择最合适的搭配。

在回答了上述两个问题之后，我们已经基本确定了适合我们的双筒望远镜的最基本参数。那还有哪些参数值得我们注意呢？我们来看一台市售双筒望远镜的参数表（表 3.1）。

表 3.1 NL 8 × 42 双筒望远镜参数表

名称	数值	名称	数值
倍率	8×	最近对焦距离	2 m
口径	42 mm	屈光调节	±4 dpt
出瞳直径	5.3 mm	屈光矫正	5 dpt
出瞳距离	18 mm	透光率	91%
实际视场（千米视场）	159 m/1000 m	瞳距	56 ~ 74 mm
实际视场（度）	9.1°	微光系数	18.3
表观视场	69°	耐候性	略

表中倍率、口径和出瞳直径已经在前面讨论过。

视场在[望远镜的参数](#)一节曾经讨论过，同样，双筒望远镜也有实际视场与表观视场。除了角度，双筒望远镜的实际视场有另一种表示方式，称为千米视场（也有用千英尺视场表示的，在国内少用一些），即假设双筒望远镜望向一千米以外的物体，整个视场的实际宽度。实际视场和倍率有关，当需要较大的实际视场时，可以选择低倍

率的双筒望远镜。对于双筒望远镜，表观视场不是百利而无一害的，更大的表观视场会让光学矫正的难度增大，我们常常会发现，同价位的双筒望远镜，表观视场大的产品成像质量会稍低于表观视场小的产品。笔者倾向于在这对权衡中选择表观视场大的双筒望远镜。

出瞳距离在望远镜的参数一节也曾经讨论过。一般双筒望远镜会配备旋升眼罩，可以通过调整旋升眼罩来调整眼睛与目镜的距离，使其接近出瞳距离，达到最好的观测体验。

最近对焦距离指双筒望远镜可以调焦到清晰的最近距离。当用双筒望远镜对准低于这个距离的物体时，无论如何转动调焦轮，都无法将图像调焦至清晰。最近对焦距离越近越好，这样我们能更方便地用双筒望远镜看近处的物体。有些双筒望远镜经过专门设计，最近对焦距离很近，可以观测昆虫和花卉。

屈光度调节就是平衡左右眼屈光度的不一致。双筒联合调焦的双筒望远镜一般都会配备一个屈光度调节轮，一般在右侧的镜筒上，使用双筒望远镜前应该先调整屈光度调节轮，补偿右眼与左眼的视力差异。屈光度调节的范围越大，容许的左右眼视力差异越大。

屈光度矫正就是双筒望远镜设计时容许的视力补偿范围。如果您的近视度数超过这个范围，就必须戴眼镜观测，否则可能无法调焦至清晰。

透光率是影响双筒望远镜成像亮度的次要因素。相较于出瞳直径它的影响小得多，出瞳直径相同时，透光率越大，成像亮度越高。同规格产品中，透光率越高越好。

瞳距调节范围是双筒望远镜两个镜筒之间的距离调节范围。双筒望远镜一般能通过中间的铰链调节两个镜筒之间的距离。每个人的瞳距不一样，使用双筒望远镜前应该先调整两个镜筒之间的距离，使其适合自己的瞳距。

尺寸和重量则是双筒望远镜的几何属性。我们希望双筒望远镜更轻更小更便携。**耐候性**是望远镜对高温、低温、水等因素的抗性。如果使用环境比较恶劣，需要考虑耐候性。

有些双筒望远镜使用了**ED 玻璃**。ED 玻璃即低色散玻璃，可以降低双筒望远镜的色差，但是价格较贵。需要稍微注意的是，因为 ED 玻璃已经被广泛应用，有些高端双筒望远镜已经不再标注使用了此类玻璃。

有些双筒望远镜使用了**平场设计**。普通双筒望远镜视场边缘成像质量会显著下降，而使用平场设计之后，边缘成像质量将会提高。平场设计一般有两种，一种是目镜平场，通过改变目镜结构提高边缘像质，但是对于近视但不戴眼镜观测的人，效果不佳；另一种是焦前平场，通过加入专门的平场镜片提高边缘像质，技术难度较大，效果较好，但将引入畸变，造成滚球效应。

以上这些参数可以在表格里体现，但双筒望远镜的光学质量是表格所无法描述

的。光学质量是进阶的天文观测者需要着重考虑的因素，但是它难以量化，主观因素较强，对于刚刚接触双筒望远镜的人来说，甄别双筒望远镜光学质量的优劣比较困难，因此这里只简单叙述。

锐度、对比度。锐度越高图像越清晰，如果不是 200 元以下的双筒望远镜（因为双筒望远镜放大倍率一般不大），视场中央锐度的差别不容易看出来。至于视场边缘的锐度，使用平场设计的双筒望远镜有很大优势。对比度越高图像的反差越大，不同人对对比度大小的喜好不同，需要自行抉择。

色彩。不同型号双筒望远镜呈现的色彩不同，有些色温偏暖，有些色温偏冷。同样，不同人对色彩的喜好不同，需要自行抉择。有些双筒望远镜色彩会显著偏黄，购买前需要注意。

像差。双筒望远镜主要的像差有色差、像散、场曲、畸变等。天文用途中，色差最为重要，需要尽量减少，带有 ED 玻璃的双筒望远镜色差较小。像散和场曲主要影响视场边缘锐度，带有平场设计的双筒望远镜可以减小像散和场曲。畸变是天文用途中最次要的像差。

参数里没有体现的，还有双筒望远镜的做工、人体工程学、观测舒适度，这些也是高端双筒望远镜溢价之处。在预算较高时，这些方面非常值得考虑。同价位的双筒望远镜，这些参数和性能是此消彼长的。读者可以根据需要，优先选择于某几个参数或性能较为突出的产品。如果需要各种参数和性能都很优异的产品，那就必须加钱了。

最后是一些小 tips。使用双筒望远镜时，有些人会觉得头晕。除了双筒望远镜光学质量较差之外，还有这样一些可能：

① 没有调节瞳距。前面已经说过，使用双筒望远镜前应该先调整两个镜筒之间的距离，使其适合自己的瞳距。具体的调节方法是，通过铰链调节两个镜筒之间的距离，使得双眼看到的两个圆形图像重合，这一步称为“合圆”。

② 没有调节屈光度。前面也已经说过，使用双筒望远镜前应该先调整屈光度调节轮，补偿右眼与左眼的视力差异。具体的调节方法是，先闭上右眼睁开左眼，用左眼看远处某个物体，调节调焦轮使得左眼看到的图像清晰。再闭上左眼睁开右眼，看同一个物体，调节屈光度调节轮，使得右眼看到的图像也清晰。

③ 光轴不平行。当前面的工作已经完成时，观测仍然导致头晕，就可能是光轴问题。光轴是否平行需要使用仪器测试，可以联系卖家。

使用双筒望远镜，或者是用手机在目镜后拍摄时，有些人会发现看不全或者拍不全视场，视场边缘变成一圈黑色。这是因为眼睛或者手机镜头没有在合适的位置。当眼睛或者手机镜头与目镜之间的距离符合出瞳距离，这个问题就解决了。

补充阅读

望远镜的像差

■ 色差

因为透镜对不同波长的色光有不同的折射率，可能会导致望远镜不能将不同波长的色光汇聚到同一点，产生色差。色差表现为图像明暗交界处产生五彩斑斓的边缘。

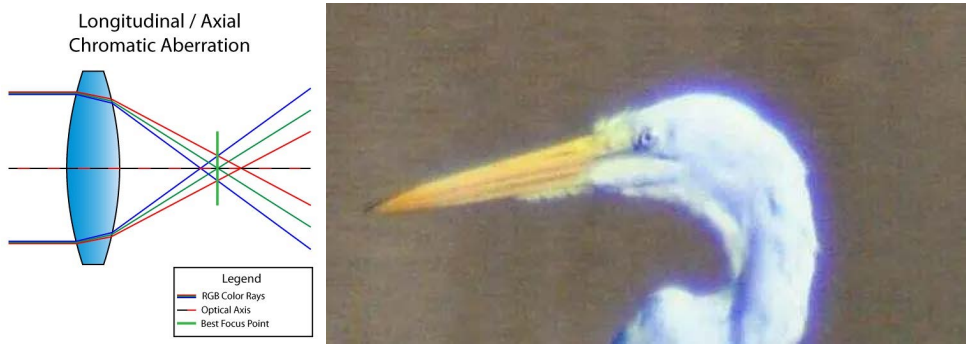


图 3.31 色差示意图

■ 球差

使用球面的透镜或反射镜时，从边缘入射与从中心入射的光线不能汇聚在同一个点上，将会产生球差。球差会导致望远镜中心成像不锐利。

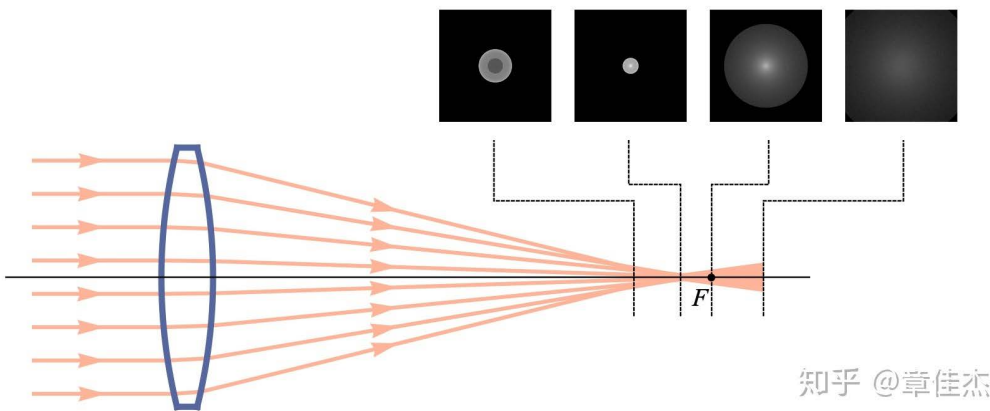


图 3.32 球差示意图。图片来源见水印

彗差

因为透镜或者光学设计的缺陷，导致恒星等点光源产生类似彗星形状的变形，称为彗差。

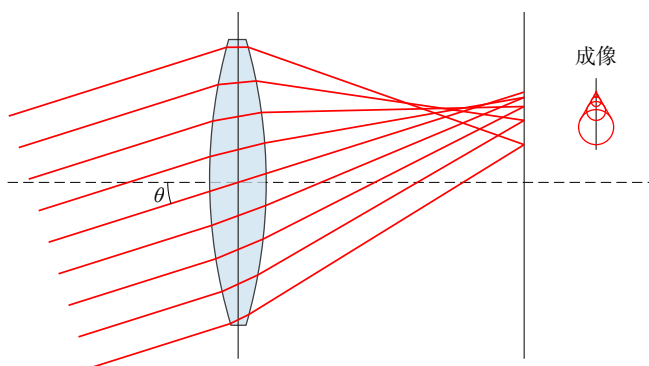


图 3.33 彗差示意图

像散

光学系统的像散和眼睛的散光是同一类光学缺陷，光线经过光学系统的不同子午线入射后不能汇聚到同一个点上，就会产生像散。像散在视场边缘更明显，表现为恒星变形成类似飞鸟的形状。

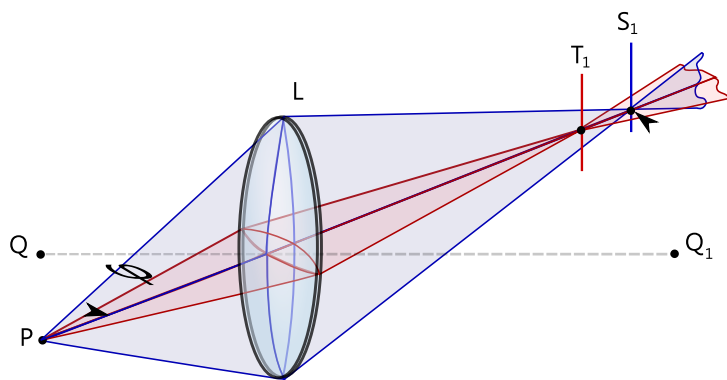


图 3.34 像散示意图

■ 场曲

场曲就是像场弯曲。如果光学系统的缺陷使得焦平面不再是一个平面，而成为一个曲面，就产生了场曲。场曲表现为视场边缘模糊，成像锐度下降。

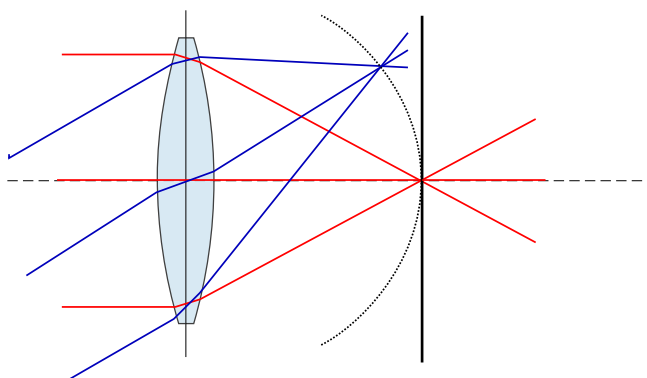


图 3.35 场曲示意图

■ 畸变

如果实际上横平竖直的物体，在视场中不再横平竖直，就产生了畸变。

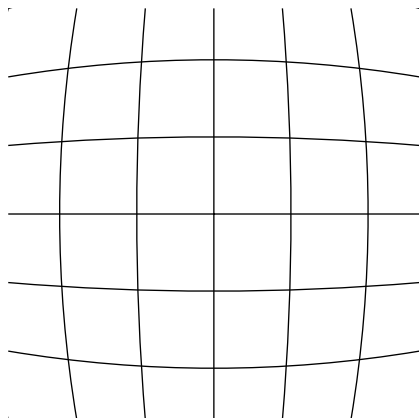


图 3.36 畸变示意图

第四章 太阳系

① 太阳系概述

太阳系（Solar System）是地球所在的，受太阳引力约束在一起的天体系统，包括太阳、行星及其卫星、矮行星、小行星、彗星和行星际物质。

恒星太阳是这个天体系统的主导者，其质量占到了整个太阳系质量的 99.86%，其他所有天体均在太阳引力作用下运动。

除了太阳之外，余下的 0.14% 质量由这些天体贡献：

1. 八大行星——水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星；
2. 八大行星的诸多卫星；
3. 以冥王星为代表的矮行星；
4. 火星与木星轨道之间大量存在着的，在其他区域也有分布的小行星；
5. 彗星、流星以及其他星际物质。

这其中，小行星、彗星、流星体又统称为**太阳系小天体**。

太阳系的形成 太阳系是宇宙间广泛存在着的恒星-行星系统中普通的一个。按现今科学界主流的看法（星云假说），太阳系形成于约 50 亿年前的一团原始星云，受某种扰动，此星云偏离引力平衡态而在自身引力作用下开始收缩，核心坍缩成为恒星太阳，而余下的少量物质带有一定角动量^①，在不断旋转中发生碰撞与融合，逐渐形成其他天体。

太阳系天体的运动 太阳系天体的运动有内在的一致性，它们绝大多数近似地分布在黄道面（地球的公转轨道平面）附近，而且大部分太阳系内天体的公转方向是一致的，这也是星云假说的基本事实依据。

① 对于不理解角动量的读者，你只知道这些物质在绕着太阳以相同方向转动就可以了。

2 太阳

太阳虽然是太阳系的主宰，是无数先民所崇拜的神明，但是它在恒星中并不特殊——它不过是银河系中数以千亿计的恒星中的一颗。太阳的直径约为 139 万公里，质量约为地球的 33.3 万倍，等效表面温度为 5772K^②，年龄约 50 亿年，仍然处于壮年期，在所有恒星中既不是最亮的，也不是最大的。和其他恒星一样，太阳依靠中心巨大的引力压形成的高温诱发核聚变反应，从而散发光和热。

表 4.1 太阳的一些物理参数

参数（单位）	数值
自转周期（日）	25.05
质量（地球 = 1）	3.33×10^5
平均直径（km）	1.39×10^6
平均密度（g/cm ³ ）	1.408
等效表面温度（K）	5772
绝对星等	4.83
视星等	-26.7

太阳的结构

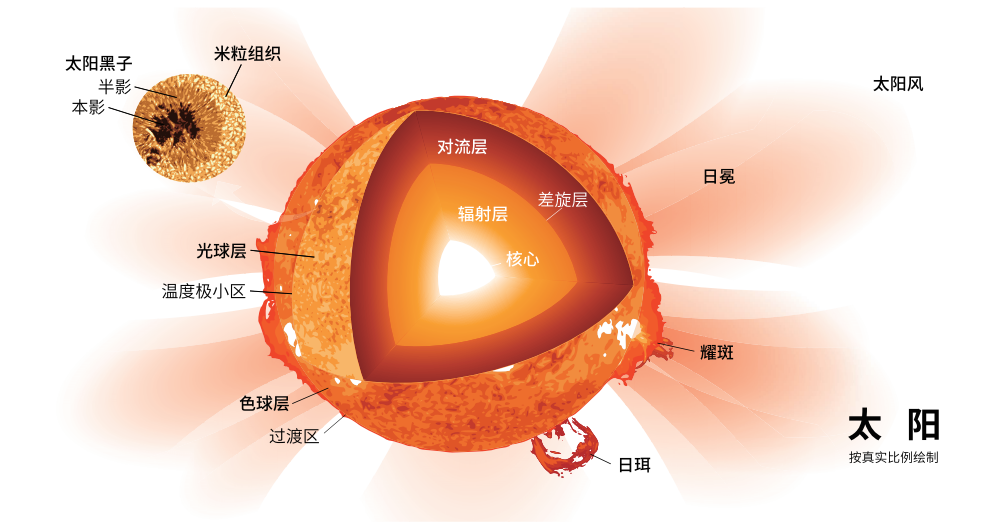


图 4.1 太阳结构示意图。图片来源：Wikipedia。

太阳内部从内向外可分为核反应区（核心）、辐射层和对流层，表面存在太阳大气。

核反应区 是核聚变反应发生的区域，这里的核心温度达到了 1.50×10^7 K，太阳 99% 的能量从这里产生。这一区域半径约为 0.25 倍太阳半径（1/64 太阳体积），质量却占到了太阳质量的一半以上。

^② 等效表面温度的概念在本书第六章《恒星》中会介绍。本文中的 K、开、开尔文均是国际单位制中的温度单位，温度每升高 1K 相当于升高 1℃，而 0℃ 相当于 273.15K——不了解的读者可以检索“热力学温标”，获得更详细的介绍。

辐射层 将核反应区的能量以光的形式向外传输，温度大大降低。太阳核心发生核聚变产生的光子释放出来后，在辐射层不断被物质吸收和再辐射，经过漫长的时间才能到达太阳表面。

对流层 温度下降到 $5.0 \times 10^5 \text{ K}$ ，因巨大温差产生的热对流得名。^③

太阳的大气 对流区外面是太阳的大气层，从里向外又可以分为三个层圈：**光球层**、**色球层**和**日冕层**。

光球层的温度不高，只有约 5780 K，我们平常看到的日轮就是光球层；光球层之外是色球层，它比光球层更厚更热，却比光球层暗得多，故人们最早只能在日全食时观测到它。更外层是日冕，这是太阳大气的延伸部分，延伸到比太阳半径还要远的地方。日冕有着异乎寻常的、目前任何理论都无法完美解释的超高温度。

在这里，我们不花篇幅介绍太阳结构的形成原理，这些内容在第六章《恒星》中会具体介绍。

太阳活动

太阳的表面绝不是风平浪静的。由于磁场的复杂运动，太阳的大气层无时无刻不在发生着剧烈的能量释放，产生了很多非常壮观的太阳活动现象，主要有太阳黑子、光斑、谱斑、耀斑、日珥和日冕瞬变事件等，它们时有时无、时烈时弱，普遍以 11 年为活动的周期。耀斑、日冕物质喷射等太阳活动，都是极其剧烈的能量释放过程，其释放的高能射线对空间通讯乃至地球的生态环境有着不可忽视的影响。

太阳黑子 光球层中有些区域温度比周围低，看起来比明亮的光球层要暗不少，这样的区域被称为**黑子**（sunspot），这是肉眼可见的一种太阳活动，也是太阳上最容易观察的细节。有一些硕大的黑子甚至不用望远镜也能看得见^④。黑子中间深色的地方称为**本影**，周围浅色的地方称为**半影**，半影区温度介于本影和光球之间。太阳黑子是强磁场区，强烈的磁场活动抑制了对流作用，使得表面温度相对较低、颜色较暗。

利用望远镜往往能看到不少黑子。需要注意的是，任何时候都不能直接把望远镜指向太阳，必须在做好安全的减光操作之后才能观察太阳，否则将会对眼睛带来不可逆转的损害。我们会在本节的最后总结观察太阳的正确方法。

日珥（prominence）是太阳表面喷出的炽热的气流，是发生在色球层的一种非常强烈的太阳活动——这也意味着我们在一般时间、利用一般的方法，无法对它进行观测。我们一般会使用日珥镜，或者在日全食时观察日珥。日珥就是“日耳”，它像耳朵一样，从太阳表面伸展出来。较大的日珥是普通爱好者能看到的太阳表面最壮观的图景之一。

^③ 辐射层和对流层之间形成的一个过渡层叫差旋层，目前这还是一个假说。

^④ 《汉书》记载：三月乙未，日出黄，有黑气大如钱，居日中央。

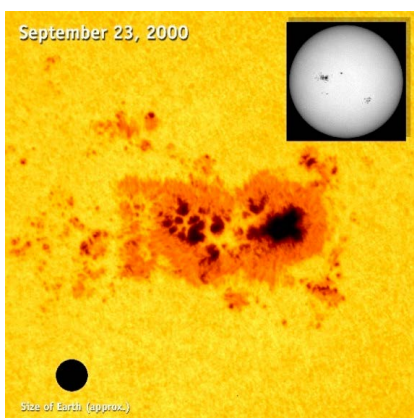


图 4.2 太阳黑子，左下角为地球的尺度比例。图片来源：thesuntoday.org

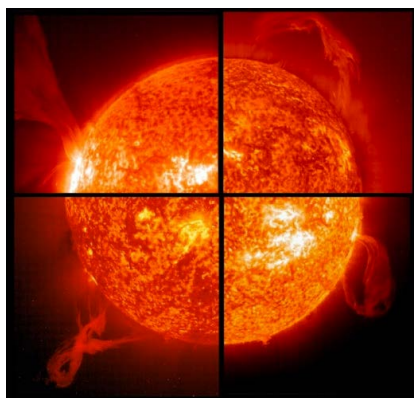


图 4.3 硕大的日珥，图片来源：thesuntoday.org

太阳的观测方法

观测太阳最核心的注意事项无非减光，不过具体而言又衍生出了不少可行的方法。这里需要特殊强调戴墨镜、使用 X 光片、啤酒瓶底和水盆泼墨等均不是正确的方法。在这里我们主要介绍三种太阳观测的方法，希望读者对观测太阳的注意事项有所了解。

巴德膜 目前业余观测最常用的方法。观察日食时的“日食眼镜”也用到了巴德膜。使用巴德膜观测太阳能清楚地观测、拍摄到太阳黑子；如果口径足够，你还能看见太阳表面颗粒状的米粒组织。在第三章《天文望远镜》中有对其更具体的介绍。

投影法 在教学级别的天文台里很常用的方法，这种方法就是把望远镜当作相机镜头，把一块白色投影板当作底片，利用漫反射减光的原理，通过投影观察太阳表面。一般来说，这种方法只能用来观察黑子、日食、凌日，适合集体性质的参观，不适合照相观测；投影板上像的分辨率很有限，难以看到丰富的细节。

日珥镜 其主体是一块窄带滤镜，起到减光和滤光的双重作用。具体原理在第三章《天文望远镜》有具体介绍，这里不再赘述。每年北大的《基础天文》课上都会组织同学们使用日珥镜观测太阳，青年天文学会也会定期使用学会的日珥镜进行观测。

其他观测太阳的方法还有赫歇尔棱镜等，在这里我们不做详述。

在这节的最后需要补充两个小知识（或者说是常识更为恰当）：

(1) 太阳与地球的平均距离称为天文单位（AU），一个天文单位大约是 1.496 亿千米，这个单位在接下来的内容中会经常用到；



图 4.4 2012 年 5 月 21 日东南沿海大日食，福州一中的同学利用投影板观察日环食。图片来源：@科学超电磁学

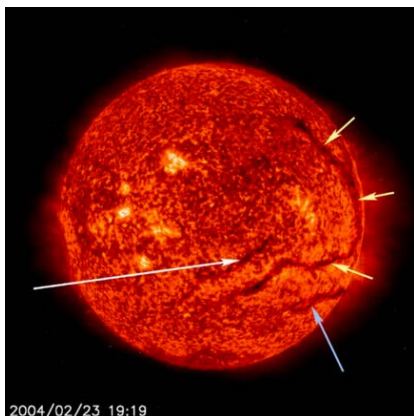


图 4.5 日面上的暗条，如箭头所示。图片来源：thesuntoday.org

(2) 太阳的角直径^⑤约为半度 ($30'$)，这个值的大小跟早上看还是中午看关系不大——“日初出时大如车盖”是一个有关参照物的错觉。

3 月球

月球是地球的卫星，和地球一起组成了地月系，共同绕着太阳公转。夜空中一轮明月总能勾起人们无限的遐想。在第一章，我们已经对月球进行了简单的介绍，并讲解了月相的成因。作为业余天文中的重要观测目标，这里我们有必要对月球进行进一步的介绍。

表 4.2 列出了月球的一些重要轨道和物理参数。月球是一个直径约为 3500 km 的球体，距离地球的平均距离约为 384 400 km，在地球上看上去角直径也大约为 $30'$ ，和太阳接近——这种巧合也带来日全食、日环食这样的天象奇观。一个有趣的事情是，月球自转周期和绕地球的公转周期相等，这导致了一个有趣的现象：月球几乎只有一面始终面对着地球。实际上，这个正面还有 8% 的摆动，叫做天平动^⑥。因此，我们在地球上最多能看见月球表面 60% 左右的区域。

表 4.2 月球的一些物理参数

参数 (单位)	数值
半长轴 (10^5 km)	3.84
近地点 (10^5 km)	3.63
远地点 (10^5 km)	4.05
质量 (地球 = 1)	0.0123
平均直径 (km)	3475
平均密度 (g/cm^3)	3.34
表面重力加速度 (地球 = 1)	0.165
最亮星等	-12.9

⑤ 视直径 (角直径) 在天文观测中是一个很有意义的量：它表征你看到天体的大小，这决定了你应该用多大视野、多高倍数的望远镜进行观测。人眼极限分辨能力约为 $1'$ 。详见维基百科 Angular diameter 词条。

⑥ 月球天平动示意图： https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Lunar_libration_with_phase2.gif

月球表面都有什么特征呢？我们常说的白兔捣药、吴刚伐桂只是传说而已。今天我们知道，月球的表面没有生命存在，是名副其实的不毛之地。

然而在望远镜中看去，月球表面丰富的地貌却足以让人惊叹——望远镜中的上弦月，绝对称得上是天空中最让人印象深刻的目标。

月球表面大片的暗处叫做**月海**（lunar mare），实际上这里没有一滴水，只是广阔的平原。比较著名的有静海、酒海、风暴洋等；更多的是坑坑洼洼的**环形山**（crater），它们是陨石撞击的遗迹，比较著名的环形山有克拉维乌斯环形山、第谷环形山、开普勒环形山等，它们多以名人命名；月球上还有很多山脉，比较著名的有亚平宁山脉、高加索山脉等，它们多以地球上的山脉命名；此外，月球上还有不少峡谷（被称为月溪）、峭壁等地貌，非常值得寻找、观察。

满月时，最引人注目的目标是月面中南部的、有着漂亮的辐射纹的第谷环形山，还有比它略小，细节同样丰富的哥白尼环形山。

对月球的介绍最好的收尾莫过于这张阿波罗 8 号拍摄的照片（图 4.6）。地球很小，宇宙很大，真希望有一天人类能够在茫茫的宇宙之中，找到自己的回音。



图 4.6 阿波罗 8 号在月球轨道上拍摄的地月合影

4 行星及卫星

行星概述

行星是太阳系天体观测的主体，解释行星的运动是人类对天文学最初始、最基本的认识。观测行星也是一项充满挑战和趣味的工作。

现在的说法认为，太阳系有八大行星，按照轨道半径从小到大依次是：水星（Mercury）、金星（Venus）、地球（Earth）、火星（Mars）、木星（Jupiter）、土星（Saturn）、天王星（Uranus）、海王星（Neptune）。有些读者可能熟悉之前“九大行星”的说法，也就是加上了冥王星（Pluto）。在2006年的时候，由于当时冥王星轨道外小天体屡有发现，“十大行星”“十一大行星”的说法很是混淆视听，因此国际天文学联合会通过决议，重新修订了行星的定义。除卫星外，满足以下三条定义的天体为行星：

- ① 围绕于恒星运转（即公转）；
- ② 有足够大的质量来克服固体应力，以达到流体静力平衡的形状（即近于球形）；
- ③ 已清空其轨道附近区域（即是该区域内最大天体，即以其自身引力把轨道两侧附近的小天体“吸引”成为自己的卫星）。

冥王星因未能清空其轨道附近区域且质量小于后来发现的阋神星而遭到降级，被归入矮行星^⑦的行列中。在这一节中，由于矮行星观测难度较大，故不再涉及。

八大行星可以根据状态分为两类：水金地火四颗行星表面由岩石等构成，体积小而密度高，被称为“类地行星”；木土天海四颗行星表面由气体构成，体积大而密度小，被称为“类木行星”。另外，根据它们轨道半径的大小，八大行星也可以分为“地内行星”（水、金，只有二者轨道在地球轨道内）和“地外行星”两类。

在夜空中，行星看起来不会像恒星一样闪烁，这是因为行星具有一定的视面积，而恒星则足以看作为点光源。金木水火土五颗行星在夜空中都是非常明亮的天体，是普通爱好者进行行星观测的主要目标，我们会对这五颗行星的观测进行更加详细的陈述；由于篇幅限制，我们不可能面面俱到地介绍所有行星，更多细节内容烦请读者自行检索。

接下来我们将首先介绍行星的视运动规律，让大家掌握“大距”“冲日”等概念，这对于您阅读之后的内容很有帮助。

行星的视运动规律

在古希腊人眼中，天上的一切都是完美而永恒的。但行星却是个例外——它们在恒星天球中穿梭不定，古希腊人用“游走者”为它们命名。托勒密的地心说几乎完美地解释了行星的“不规则”运动，他的学说统治了天文学千年之久。然而，哥白尼等

^⑦ 矮行星满足于行星定义的①、②，但不满足③。它们的质量介于行星和小行星之间。小行星只满足定义①。

人的天文学革命将地球赶出了宇宙的中心，日心说对行星运动的解释更为完美，伽利略的望远镜更是有力地支持了日心说。天文学革命甚至倒逼了新物理学的诞生——牛顿的运动理论、引力理论都滥觞于行星问题。可以说，对行星运动的解释与观测贯穿了半部科学史。在这一小节，我们将从现代的视角来理解行星的运动。

行星相对恒星的视运动

行星与地球都在绕太阳公转，因此从地球上来看，行星的位置并不是固定的，它们在众星的背景前移动，这就是行星相对于背景恒星的视运动。

行星相对于背景恒星的视运动与地球和行星的公转都有关。行星运行的轨道平面和地球公转的轨道平面相差不多，因而从地球看去，行星总是出现在黄道附近，它们移动的路径几乎与黄道平行。以火星为例，如图 4.7 所示，行星相对于背景恒星的运动，大部分时间是自西向东的，称为顺行。但有时也会有自东向西的运动，称为逆行。在顺、逆转换期间，行星相对地球的运动方向与二者连线方向一致（行星相对于地球的切向速度为零），从地球看来，行星没有相对背景恒星的运动，就好像在天球上短暂停留，称为留。

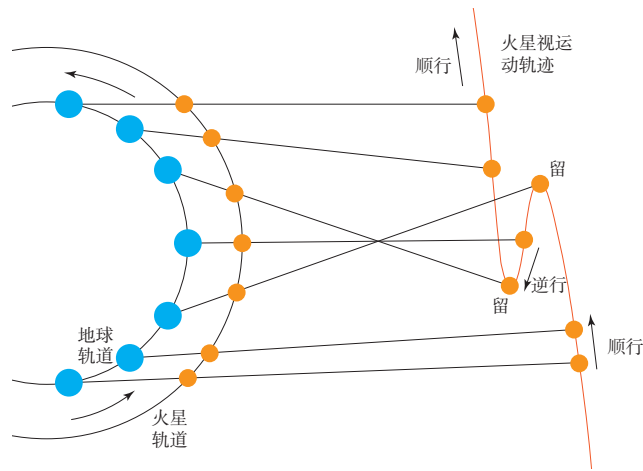


图 4.7 火星逆行示意图

行星相对太阳的视运动

行星和恒星不同，它们不是自己发光，而是通过反射太阳光发亮。因此，从地球看去，行星和太阳的相对位置决定了行星的亮度，也影响了我们对它们的观测。行星相对太阳的视运动规律，对于地内行星和地外行星是不同的。

如图 4.8 所示,地内行星相对于太阳的运动依次经过以下几个重要时刻:上合 → 东大距 → 下合 → 西大距 → 上合。上合和下合是指行星处于与太阳的黄经相同的位置,此时它们位于相同的方位。在上合、下合附近,行星淹没在太阳强烈的光芒里,难以被观测到。大距则是行星与太阳角距离最大的位置。地内行星离太阳太近,经常被淹没在太阳的光辉里。可以看出,大距是观测地内行星的最佳时间,因为此时行星与太阳的角距离最大,受太阳光的影响小。东大距时,地内行星在太阳东侧,因而会出现在日落后的西方天空:反之,西大距时,行星在太阳西侧,因而会先于太阳升起,可以在日出前观测。因为水星比金星离太阳更近,所以水星大距时的地面高度也更小,因而不易观测。

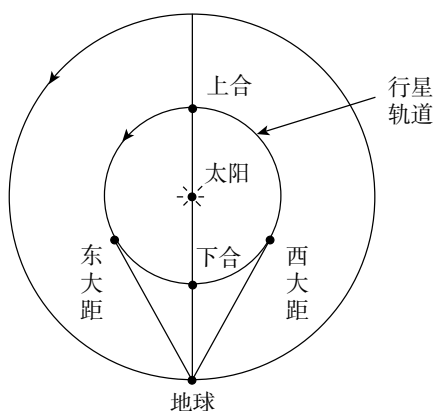


图 4.8 地内行星相对太阳视运动示意图

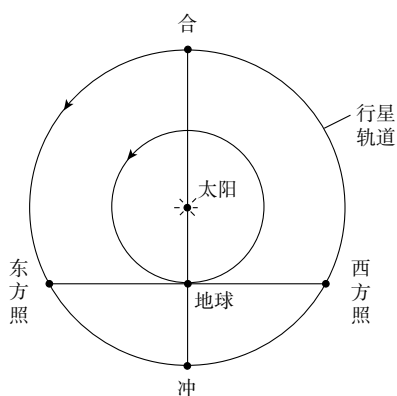


图 4.9 地外行星相对太阳视运动示意图

行星可见的时间与行星相对太阳的位置有关。上合时,行星与太阳同升同落,不能被观测到;之后,由于地内行星公转角速度比地球快,行星相对于太阳逐渐向东移动,在日落后的西方天空可见,称为**昏星**。东大距时,可见时间最长,高度最高;东大距后,行星逐渐向太阳靠拢,直到下合再次与太阳同升同落。然后,行星便运动到太阳西边,因而会先于太阳升起,可以在黎明时的东方天际见到,称为**晨星**,直到西大距,最后回到上合。

如果水星或金星下合发生在黄道面附近,地球、地内行星和太阳恰好位于同一直线上,人们就会看到它们的影像在日面缓缓通过,称为“凌日”。水星凌日平均每 100 年发生 13 次,下一次水星凌日发生在 2032 年 11 月 13 日;金星凌日则罕见的多,每隔 100 多年才会出现相隔 8 年的两次,最近的两次发生在 2004 年和 2012 年。图 4.10 是 2012 年金星凌日时的影像,日面右上角的黑色圆点就是金星。而下一次金星凌日就要等到 2117 年了。希望学会在那一天还能组织会员开展观测!

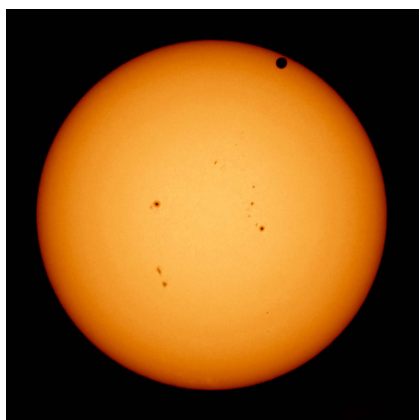


图 4.10 2012 年的金星凌日。图片来源：Wikipedia

地外行星相对于太阳的运动则会依次经历合 → 西方照 → 冲 → 东方照 → 合。如图 4.9 所示。合时，行星黄经与太阳相同，地外行星、太阳、地球大致依次排列在一条直线上^⑧；冲时，行星黄经与太阳黄经相差 180°，太阳、地外行星、地球大致依次排列在一条直线上；东方照和西方照时行星和太阳的黄经相差 90°，对应地外行星上所见地球的西大距和东大距。

对于地外行星来说，最佳观测时机是冲，此时地外行星距离地球近，夜晚可见时间长、亮度高。

由于地球和行星的轨道并非正圆，行星到达近地点和最亮的时间经常会与冲的时间相差几天，例如 2020 年的火星冲日发生在 10 月 14 日，而火星过近地点则在 10 月 6 日。不过就观测来看不必如此严格，行星冲日前后约一个月内都是很好的观测时机。行星在近日点前后的冲较接近地球，亮度也是历次冲日之中最亮的，这个冲即称为大冲。

行星相对于太阳的运动周期称为会合周期，它也是行星相对于太阳的某一个特殊位置重复的周期，如地内行星由上合到下一次上合，地外行星由冲到下一次冲的时间间隔，都等于会合周期。类似于追及问题，会合周期可以利用如下公式^⑨估算：

$$\frac{1}{P} = \left| \frac{1}{T} - \frac{1}{E} \right|$$

其中 P 表示会合周期， T 表示行星公转周期， E 表示地球公转周期。水星的会合周期最短，大约 116 天，因而一年中往往会有五六次水星大距。火星的公转周期比较接近地球的一年，因而它的会合周期最长，约为 780 天。

■ 合

除了上面提到的大距、冲、凌日等天象外，当行星之间、行星与恒星^⑩、行星和月球、恒星和月球的赤经^⑪相同时，我们就称二者相合。例如土星合木星、金星合月、土星合轩辕十四等。

两个天体相合时，它们的角距较小，位置较近。行星相合并非罕见天象，比如金

^⑧ 这是因为行星的公转轨道面倾角都很小，大致与黄道共面。

^⑨ 由于行星的轨道不是正圆，运行的角速度不均匀，行星每两次与地球会合经历的时间都会有微小的差异（最多可差几天）。这样计算得出的周期实际上是个“平均”的周期。

^⑩ 毕宿五、轩辕十四、角宿一、心宿二、北河三这五颗亮恒星位于黄道附近，一般而言恒星与行星、月球的相合都是指这五颗恒星。

^⑪ 按照中国科学院紫金山天文台编写的《中国天文年历》，行星与太阳相合是指它们的黄经相同，而行星之间、行星与恒星、行星和月球、恒星和月球相合都是指赤经相同。

星合木星通常每年就有三次之多，而行星合月更是几乎每个月都有，甚至不止一次。行星相合、行星合月时，可能会组成比较有趣的形状，适于观赏。

在月球、行星、恒星之间相合时，如果距离很近，一个天体可能会遮掩另一个天体。如果未完全遮住，称为“凌”，否则称为“掩”。月掩星较为常见，但行星凌掩行星、行星掩恒星是极为罕见的天象。最近的一次行星掩亮恒星是发生在 2044 年的金星掩轩辕十四，而最近的一次行星之间凌掩是发生在 2065 年的金星凌木星。^⑫

■ 八大行星

■ 水星

水星在中国古代被称辰星，是太阳系的八大行星中最小和最靠近太阳的行星。它总出现在太阳的附近，经常淹没在太阳光辉之中，即使在最有利的条件下，人们也只能在日落后或日出前一两个小时内看到它。水星与太阳角距最大只有 28° 。在大距（每年 6、7 次）附近，水星是一颗非常接近于地平线的黄色 0 等星，除非特意寻找，否则很难注意到它。相传波兰天文学家哥白尼虽然成功地利用日心说解释了水星的运动规律，但他一生都没有见过水星。

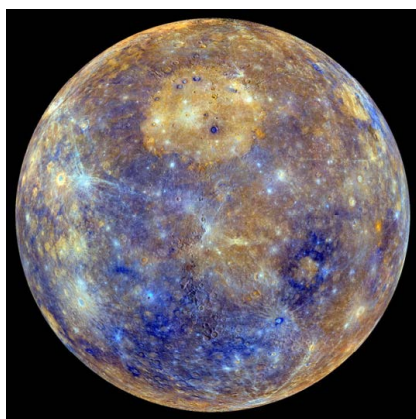


图 4.11 水星假彩色影像。图片来源：NASA

水星的轨道周期是 88 地球日，公转速度远远超过太阳系的其他星球。从地球上，它大约 116 天左右与地球会合一次。水星的公转轨道离心率约 0.206，在太阳系的八颗行星中最大（轨道最“椭”）：水星的近日点距离约 4600 万千米，而远日点距离可以达到 7000 万千米，二者相差约有 1.5 倍。

水星的运动中比较有趣的一点是它的自转-轨道共振现象。自转-轨道共振是指围绕中心天体运行的天体自转周期与公转周期为简单整数比的情况，是中心天体对环绕天体施加的潮汐力造成的。水星的自转和公转周期之比约为 2:3，这代表着水星每绕太阳公转 2 周恰好会自转 3 周（称为“3:2 旋轨共振”），每经过一个这样的周期，水星与太阳就会回到相同的相对位置和朝向：在水星上，每两“年”才能看到一次日出和一次日落。这种共振模式来源于水星公转轨道的高离心率。在近日点附近，水星与太阳显著更近，太阳对水星施加的潮汐力矩显著更大，这使得水星的自转角速度倾向于被近日点附近的公转角速度（而非公转的平均角速度）控制。而近日点附近行星

^⑫ 行星的卫星与卫星、卫星与行星之间也存在凌、掩、食、影凌等现象。

的公转角速度更快，这使得水星的自转周期比公转周期短，最终形成了 3:2 而非 1:1 的旋轨共振^⑬。

水星质量很小，只有约 0.055 个地球质量。它的外层是岩质硅酸盐组成的，内部据推测有一个很大的铁核，直径占到星球总直径的 3/4。一般认为，水星已经没有地质活动。水星表面遍布撞击坑（环形山），与月球的地貌相似。

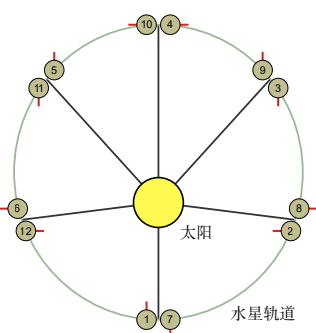


图 4.12 水星的自转和公转示意图。图片来源：Wikipedia

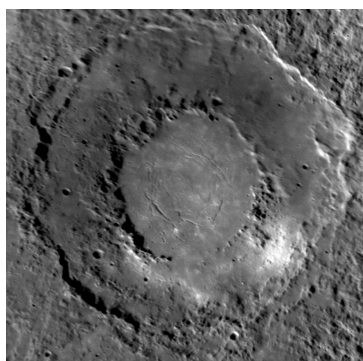


图 4.13 信使号拍摄的水星拉赫玛尼诺夫环形山照片。图片来源：NASA

水星既没有卫星，也没有足够的引力维持住大气。由于没有大气，水星表面温差极大，在近日点时，太阳直射点附近的温度可以达到 427°C ，而在没有阳光的一面，温度则会陡然下降到 -160°C 以下。有趣的是，由于水星的自转轴几乎垂直于公转平面，水星极地附近较深的环形山底部完全不会受到阳光照射，温度长期保持在 -170°C 以下。雷达探测显示这些位置很可能有水冰存在——水星上可能确实有水（但离名副其实还有些差距）。一般认为，水星不适合任何已知的生命形式居住。

从地球发射探测器到达水星比较困难。由于水星距离太阳很近，探测器从地球轨道下降到水星轨道的过程中动能会有非常大的提升，需要利用各种方式减速才能泊入环水星轨道。目前造访过水星的探测器有美国的水手 10 号（Mariner 10，1974 年飞掠水星）和信使号（MESSENGER，2011 年进入环水星轨道，2012 年主要任务完成，2015 年撞击水星表面）。2018 年 10 月，欧洲空间局和日本宇宙航空研究开发机构合作发射了贝皮可伦坡号探测器（BepiColombo），预计 2025 年进入环水星轨道。

对于爱好者而言，想要观测水星，应当选在大距前后进行观测^⑭，而且在观测方向上的地平线附近不能有遮挡。在日落后或日出前的一段时间，你有机会用肉眼或者

^⑬ 这只是一个粗略的思路，关于严格的验证，感兴趣的读者可以参考这篇短文：[Liu H S, O'Keefe J A. Theory of Rotation for the Planet Mercury\[J\]. Science, 1965, 150\(3704\): 1717-1717.](#)

^⑭ 一般而言，北半球观测水星最佳的时机是春天的东大距（黄昏）和秋天的西大距（清晨），因为北半球春天日落时与秋天日出时，黄道与地平的夹角较大，水星的地平高度较高。

望远镜找到它。在双筒望远镜中，水星不过是一个黄色的小亮点；在高倍的目镜下，你有可能看到水星的相位现象，也就是“水牙”——它的形成原理与月牙类似。

■ 金星

金星是从太阳向外的第二颗行星。它的名称源自罗马神话中的女神维纳斯，在中国古代称为太白，早晨出现在东方时称启明，晚上出现在西方时称长庚。由于接近地球且表面大气对阳光的反照率高，金星是最亮的行星，也是夜晚第二亮的天然天体（仅次于月球），视星等可以达到 -4.9 等。由于金星是内行星，它距离太阳的最大角距离也只有 48° ，因此也只能在太阳出落前后的三个小时左右内看到。

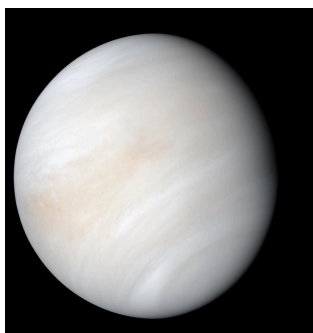


图 4.14 水手 10 号拍摄到的金星（紫外和可见波段叠加）。
图片来源：NASA



图 4.15 明亮的金星，在水面上投射出了迷人的倒影。图片来源：NASA

金星的公转周期为 225 地球日，每经过约 584 天与地球会合一次。金星的轨道离心率小于 0.01，是太阳系行星中轨道最接近正圆的。金星的自转周期（恒星日）长达 243 地球日，比公转周期还要长。不同于其他行星，金星的自转方向与公转方向相反^⑮，为自东向西。这样一来，在金星上，太阳是西升东落，且太阳日比恒星日要短。金星“逆向自转”的成因有多种解释，如天体撞击、潮汐锁定平衡等，在这里不详细介绍。

金星的体积和质量略小于地球，表面主要是火成岩平原，也分布有许多大型的陨石撞击坑和火山，熔岩流的痕迹显示金星现今仍有火山活动。金星表面有两个主要的高地区域：赤道附近的阿佛洛狄忒（Aphrodite）高地和北部的伊师塔（Ishtar）高地，类似地球上的大陆。金星没有天然卫星。

金星具有浓厚的大气，表面大气压力高达 92 个标准大气压——相当于地球上 900 多米深海的压力。金星的低层大气含有 96.5% 的二氧化碳和 3.5% 的氮气，以及少量

^⑮ 严格意义上说，天王星的自转轴倾角也大于 90° ，也可以认为是自转方向与公转方向相反，但一般表述成接近垂直。

的二氧化硫等其他气体。在金星表面极高的温度和压力下，这些成分严格来说已经不是通常的气体，而是以超临界流体状态^⑮存在。在低层大气之上有厚达 50 ~ 70 千米的硫酸云。剧烈的温室效应导致金星表面温度极高，平均温度甚至高于水星，达到约 464℃。由于金星大气的保温作用和对流作用，即便在自转如此缓慢的情况下，金星表面仍然几乎是等温的，与水星形成了鲜明的对比。

今天的金星表面已经完全不适合生物生存，只有在高层大气中还可能保留有微生物的痕迹（金星高层大气中是否存在生命仍是一个争论的热点）。不过，天体生物学家推测，在数十亿年前，金星很可能具有和原始地球类似的大气以及遍布全球的液态水海洋，具备产生生命的条件。然而，随后的太阳光度增加、液态水蒸发造成的连锁反应引发了失控的温室效应，让金星表面逐渐成了今天的一片地狱景象。

由于距离地球近，金星是早期太阳系探测计划的重要目标，但恶劣的大气环境给着陆器的工作带来很大的挑战。苏联的金星系列探测器（Venera, 1961 ~ 1984）是人类最早的行星探测器系列，其中有 10 艘探测器降落在金星表面，13 艘进入了金星大气层，获取了关于金星大气组成、温度、气候、表面地质地貌的许多数据。此后又有许多探测器进行了金星的飞掠和环绕任务，但没有再着陆过金星。



图 4.16 1982 年金星 13 号着陆器拍摄的金星地面照片。图片来源：Wikipedia

金星是夜空中最醒目的行星之一，相信每个人都看见过金星，只是不见得每个人都能准确辨认出来它。在望远镜中，金星也会表现出相位的特征，由于金星角直径更大（10" ~ 66"），“金牙”会比“水牙”容易观测得多，甚至用双筒望远镜都能看出来——早在 17 世纪初，伽利略就记载了金星的相位。读者不妨找一个合适的天气，用自己的器材观看美丽的小“金牙”。

图 4.18 呈现了 2004 年上半年金星相位的变化情况，其中 6 月 8 日发生了金星凌日现象，其浓密的大气结构在最后一张图片中一览无余。

^⑮ 在一定的温度和压力（临界点）以上，物质气态和液态的性质趋于类似，形成没有界面的均匀一相，称为超临界流体。

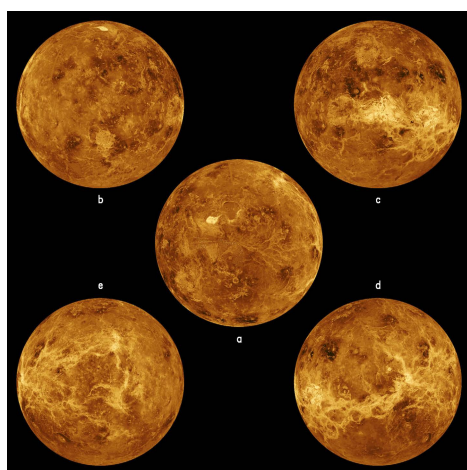


图 4.17 根据麦哲伦号探测器的雷达数据绘制的金星地貌。图片来源：NASA



图 4.18 2004 年上半年金星相位的变化情况。图片来源：Wikipedia

■ 火星

火星是离太阳第四近的行星，轨道半长轴约 1.5 天文单位，因战神马尔斯得名，在中国古代被称为荧惑。火星肉眼看起来是橘红色的，这是因为其地表广泛分布着红色的氧化铁。在太阳系的八大行星中，火星为第二小的行星。它在很多方面都与地球有相似之处。

火星的自转轴倾角、自转周期基本与地球相当，但绕太阳公转一周需花费约 687 天。从地球上，火星每 780 天才与地球会合一次，这意味着火星冲日每两年多才有一次。火星的轨道离心率接近 0.1（作为比较，地球的轨道离心率只有 0.017），近日点和远日点距离相差比较大。

火星表面大部分覆盖着氧化铁颗粒组成的暗红色沙漠，也分布着一些壮观的火山和峡谷。其中，位于北半球的奥林波斯山（Olympus Mons）相对火星表面的高度达 21.9 千米，是太阳系内天体表面最高的山峰；靠近赤道的水手大峡谷（Valles Marineris）长达 4000 千米，宽 200 千米，深 7 千米以上。火星表面的地貌可以分为南北两区，南半球多为高地，受到陨石密集撞击，而北半球相对平坦，平均高度比南半球低几千米。人们很早就开始观测记录火星表面的地形地貌，早在 1840 年，德国天文学家马德勒（Johann Heinrich Mädler）就绘制了第一张火星地图。受限于望远镜的性能，当时的天文学家认定了许多不准确或并不存在的结构，火星表面的一些暗条纹（后来被证实主要来源于视错觉）被误认作“运河”等人造物，引发了当时的人们许多关于“火星”人的想象，其中甚至还有像 H·G·威尔斯的《星际战争》这样的经典作品。

由于自身质量不够大，难以在太阳风、气体自身逃逸等因素下维持住气体，火星

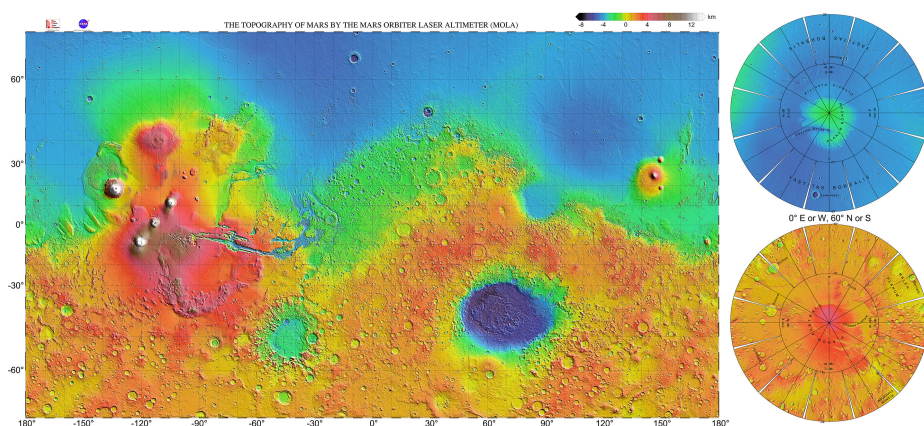


图 4.19 火星的假彩色地形图，明显可见南半球的平均地势较高。图中中间靠左的裂缝状结构是水手大峡谷，左侧靠近北纬 20° 线的山峰是奥林波斯山。图片来源：Wikipedia

的大气非常稀薄，表面平均气压只有不到地球的 1%。（地球与金星的大气压力相差两个数量级，火星与地球的大气压力又相差两个数量级。）火星的大气由 96% 的二氧化碳，2% 的氩，2% 的氮气和少量水蒸气、氧气等气体组成。由于自转轴的倾斜，火星表面也有气候带和四季更替的现象，但因为大气过薄且地面热容小，火星上的温度变化比地球上更剧烈：极夜时的南极温度可以低至 -143°C ，而夏季的赤道气温可以高达 35°C 。有趣的是，由于轨道离心率大，到太阳的距离对火星气候的影响比地球的相应情况明显得多。与地球相同，火星过近日点时时值北半球冬季和南半球夏季，过远日点则在南半球冬季和北半球夏季。这使得火星南半球的季节变化比北半球更极端：南北半球夏日的气温可以相差 30°C 。如果火星上真的有人居住，大概大多会生活在北半球。火星的两极有主要由水冰组成（约占 70%）的白色极冠，在地球上用业余望远镜就能看到。随着季节变化，二氧化碳干冰会周期性地沉积和挥发，造成极冠大小变化。

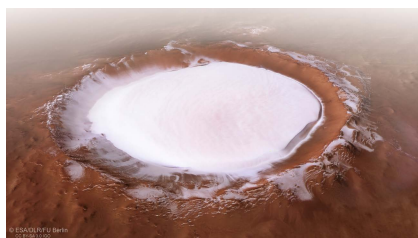


图 4.20 火星北极附近科罗廖夫环形山内积累的大量水冰。图片来源：ESA

另外一个值得一提的火星气候现象是沙尘暴。相信看过《火星救援》的读者都对火星沙尘暴印象深刻。虽然气压很低，火星的大气还是足以产生飞沙走石的强劲风暴，风速可达 160 km/h ，相当于 14 级飓风。火星上时常会发生遍及全球的巨型沙尘暴，从地球上的望远镜中看，巨型沙尘暴中的火星表面一片模糊，地形特征难以辨认。

火星表面是否存在水和生命是很多喜欢天文的人都关心的问题。以目前的观测事实，火星表面上没有生命，不过确实存在着以水

合物和水冰的形态存在的水^{①7}。所谓殖民火星，目前来看也只是一个乐观的设想。

很多时候，火星被比作“死亡的地球”。早期人们根据地质地貌探测数据推断，在约 38 亿年前，火星表面存在着遍布全球的水体，且气压和温度都显著比今天要高。后来发现的许多迹象，如侵蚀痕迹、三角洲沉积、仅在液态水时能形成的特殊矿物结核等，都强烈支持火星上曾经广泛分布着液态水，具有河流、冰川活动和水循环，但是否存在过全球性的海洋目前在学术界还有争议。2010 年，一项基于三角洲和河谷地貌的研究认为火星曾经的海洋面积占到了表面积的 36%。这样的条件似乎能够支持原始生命起源和演化。然而，最晚从 32 亿年前开始，火星的宜居性就开始逐渐降低，直至完全不适合已知类型的生命存在。根据现有的研究和假设，可以拼凑出一段悲壮的历史：几乎在原始地球上生命起源的同时，在尚有磁场和较厚大气庇护的火星，或许是在遍布北半球的海洋表面，或许是在陨石撞击冰盖形成的热泉口处，也诞生了类似地球上古菌的生命。它们增殖、变异，在这个距离地球上亿千米的世界独立演化出了一棵不同的生命之树。几乎与此同时，猛烈的陨石撞击让火星逐渐失去了全球性的磁场，太阳风开始迅速侵蚀本就不浓密的大气。海洋开始蒸发、冰冻，气候开始劣化，宇宙射线无休止地肆虐。一个又一个物种灭绝了，生命之树树枝折断的速度超过了新枝发芽。最终，最后一群顽强的生命在与恶劣环境的斗争中败下阵来，火星生物至此消失得无影无踪，好像从未存在过。这便是火星——“死亡的地球”的故事。

这样的假说足够引人遐想，也在大众文化中相当流行，但迄今为止，人们还没有得到火星上曾经适合生命居住的确凿证据。在天体生物学界，火星过去是否存在过生命仍然是一个富有争议的话题——时至今日，我们仍然不知道火星究竟是一处失落的乐园，还是自诞生以来一直都了无生机。自上世纪 70 年代以来，火星岩石中多次发现过疑似微生物化石和遗迹化石的结构，但它们随后都被认为更可能由非生命过程产生。2018 年，雷达探测在火星的南极冰盖下发现了一处宽约 20 千米的冰下湖，乐观的科学家猜测，它可能会是古老的火星生命最后的避难所。让我们期待火星探测任务的更多发现吧。

火星有两个天然卫星：火卫一（Phobos）和火卫二（Deimos），二者均很小，利用业余望远镜很难观测到。它们在 1877 年才被发现，名字来源于希腊神话中阿瑞斯（即拉丁语中的 Mars，火星名字的来源）和阿佛洛狄忒（即拉丁语中的 Venus，金星名字的来源）的两个儿子。火卫一最大直径约 27 千米，火卫二最大直径约 15 千米，

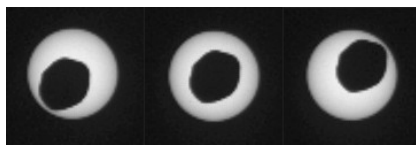


图 4.21 2013 年 8 月好奇号拍摄到的火星日环食。图片来源：NASA

^{①7} 今天的火星的温度范围看似可以允许液态水存在，但由于气压过低，火星上绝大多数水冰在升温时会直接升华为水蒸气。最近的研究认为，盐度很高的液态水可能会季节性地短暂流动在火星表面。

形状都不规则，天文学家推测，它们可能是火星俘获的小行星。火卫一的轨道高度只有约 1.5 倍火星半径，绕火星公转的速度比火星的自转还快，在火星上看，它是西升东落。由于火星的卫星都太小，从而在火星上观测时它们不足以遮挡住整个日面，因此火星上不会发生日全食，只会发生日环食或偏食。2013 年 8 月，好奇号火星车拍摄到了火卫一形成的火星日环食过程。

自上世纪 70 年代以来，人类已经向火星发送了数十枚探测器，在写下这段话时，有 8 枚火星轨道器和 6 枚着陆器（和火星车）仍在工作。**第八章《太空探索》**中选取几次重要的火星探测任务作了详细的介绍，在这里不再赘述。

火星到地球的距离大约在 0.4 AU 到 2.6 AU 之间波动，因而火星的亮度变化比较大，最亮的时候（一般在火星大冲附近）可以达到 -2.9 等，视直径可以达到 25"，小冲的时候约 -1.4 等；而火星最暗的时候有 1.9 等，视直径只有 3.5"。火星大冲是天文爱好者观察火星的最佳时机，一般每隔 15 ~ 17 年会再次发生。观测火星一般选择在冲日前后。肉眼看上去，火星只是一个明亮的小红点；利用望远镜，可以看到两极的极冠和地面上的明暗变化。由于火星的视直径很小，想清晰地分辨这些地面特征往往需要良好的大气条件和足够的观测技巧——这也需要读者反复地观测、练习，积累经验。

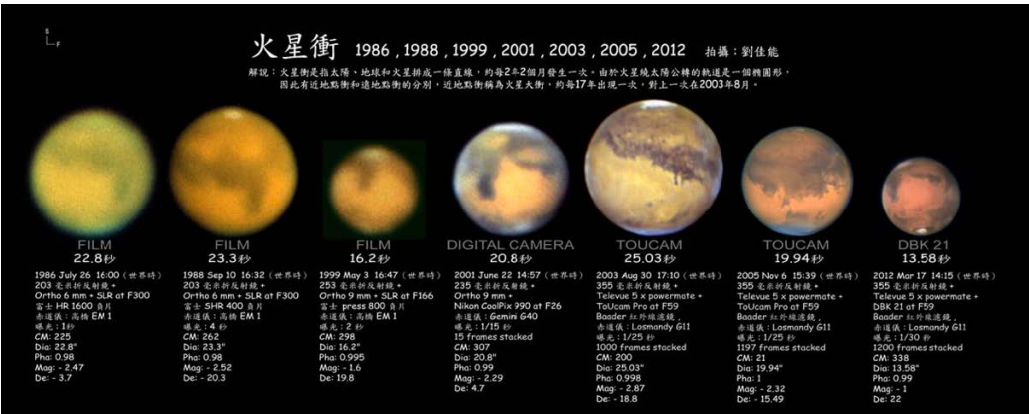


图 4.22 香港著名天文爱好者刘佳能所拍摄的 7 次火星冲日的影像，其中 1988、2003 年是大冲。从胶片时代，到千禧年前后的数码相机时代，再到后来的行星摄像头，这七张照片不止见证了火星的运转，还见证了人类文明的进步——行星摄影的技术，始终前进在路上。图片来源：newcanon（牧夫天文论坛）

■ 木星

木星是太阳系从太阳向外的第五颗行星，也是从内向外的第一颗气态巨行星，并且是质量最大的行星，相当于太阳系其他行星质量总和的 2.5 倍（但仍不足太阳的千

分之一)。木星的西名来自罗马神话中的众神之王朱庇特（宙斯）。从地球看木星，它的视星等可以达到 -2.9 等，是继月球和金星之后，夜空中平均第三亮的天体。木星在各国古代天文学中都有着非常重要的地位。中国古代称木星为岁星，并根据其运行制定了以 12 年为周期的岁星纪年法，之后演变为干支纪年；古巴比伦人根据木星的轨道周期，定义了十二星宫。

木星轨道半长轴约 5.2 个天文单位，每 11.86 年绕太阳一周。从地球上，木星平均每 399 天与地球会合一次，因此木星冲日几乎每年都会有一次，每年的时间推后一个多月。由于其巨大的质量和引力，木星的运行对太阳系的演化和稳定有着举足轻重的作用，现有的许多太阳系演化模型都涉及了历史上木星轨道的巨大变迁。木星的自转周期只有不到 10 个小时，居于太阳系各行星之首，持续观测木星或间隔一段时间拍照，都能明显观察到木星的自转。快速自转让木星的星体更加扁平，在业余设备拍摄的照片中，就能发现木星赤道附近的凸起。

木星是一颗气态巨行星，主要由氢构成，它没有明显的“地面”，从大气表层向下直至核都是越来越稠密的流体。木星的内部结构一直是行星科学家感兴趣的问题，其内部极高的温度和压强足以产生一些在理论上被预言过，但在实验室中难以制备的物质存在形式，例如著名的金属氢。根据最新的探测结果，木星最外层约 1000 km 的物质主要为气态，在此之下直到约 10 000 km 深主要由超临界流体氢组成，更深处为液态金属氢，最内部则是富含重元素的、边界不明显的核。

木星的表层永久覆盖着不透明的云层，云层的最高层由氨和硫化铵微晶组成，中层主要是铵盐结晶，而下层可能由水冰组成。我们能观测到的木星云带就是最高层的氨微晶层，其颜色来源于微量的含碳、含磷物质与太阳紫外线的作用。木星的高层大气运动非常剧烈，云带的形态和宽度都在持续变化。位于南赤道带边缘的大红斑是一个至少持续了 200 年的巨型反气旋系统，但近年来在不断缩小，如果一直保持最近的缩小速率，在十几年后就会完全消失。

截至《指南》最近一次修改，木星已被发现了 80 颗天然卫星^⑮，这个数字肯定会随着时间的推移不断地增加。对于普通的爱好者而言，我们主要能看到木星的四颗伽利略卫星，由内而外依次为：木卫一 Io、木卫二 Europa、木卫三 Ganymede、木卫四 Callisto，其中木卫三是太阳系最大的卫星，直径达 5262 千米，比水星还大。这四



图 4.23 利用 10 寸牛反拍摄的木卫一 Io 影凌木星，木星表面黑色的是木卫一的影子，红色圆斑就是大红斑。图片来源：坐照（牧夫天文论坛）

^⑮ 更新至 2021 年 8 月。包含了已经确认的 79 颗和 2021 年 6 月底由爱好者发现的待确认的 S/2003 J 24。

颗卫星首先由伽利略发现^⑮，后来分别以宙斯的情人们命名。有趣的是，木卫三和木卫二、木卫一保持着轨道共振关系：木卫三每公转一周时，木卫二公转两周、木卫一公转四周。木星有暗淡的环系，业余望远镜观测不到。

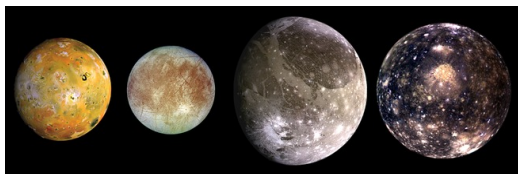


图 4.24 木星的四颗伽利略卫星（顺序：一二三四）。图片来源：Wikipedia

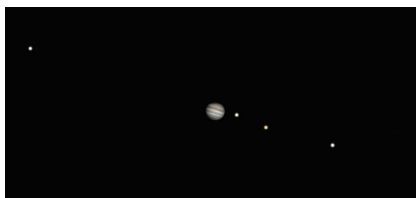


图 4.25 一般的望远镜中木星及其卫星应该呈现的样子，图片中从左到右依次是木卫四、木星、木卫二、木卫一和木卫三。模拟软件：Stellarium

自 1973 年以来，已经有 9 枚人类探测器造访过木星，其中 7 枚在前往其他目标途中飞掠木星，2 枚（美国的伽利略号，1995 年入轨，和朱诺号，2016 年入轨）执行了环绕任务，其中朱诺号目前仍在轨工作。

木星的角直径最大可以达到 $50''$ 以上，最小也有约 $30''$ ，用双筒镜就很容易分辨出盘面，用小型望远镜就能看到表面大的特征。木星观测主要有如下几个看点。首先是卫星，四颗卫星（有的卫星可能会因发生凌木现象或被木星掩食而无法看到）和木星近似排列成一条直线，在望远镜中非常可爱；另外，木星的本体上也有很多壮观的细节：像大理石一样的云带、硕大饱满的大红斑等都是木星上吸引人的目标——如果想特意观测大红斑，最好提前查询红斑中天时间^⑯，在中天前后一小时内观察。进一步地，你也可以观察木卫的凌木、影凌^⑰。

■ 土星

土星是太阳系从太阳向外的第六颗行星，大小仅次于木星，西名来源于罗马神话中的农业之神萨图尔努斯得名。在中国古代，土星也被称为镇星。在肉眼看来，土星是一个 $0 \sim 1$ 等的小黄点，其视直径约 $15 \sim 20''$ 。

土星的轨道半长轴为 9.6 天文单位，约 29.7 年绕太阳一周，与地球的会合周期约为 378 天。土星的自转也很快，周期仅有约 10.5 小时，这使得它呈现明显的旋转

^⑮ 在天况良好、木卫运行位置合适的情况下，视力好的人可以用肉眼分辨出木卫三。我国天文学家席泽宗院士考察古籍，认为战国时期的中国天文学家甘德就观测到并记载了木卫三。

^⑯ iOS 上有一个叫做 JupiterMoons 的应用，由 Sky&Telescope 开发，可以用于查询木卫位置及红斑中天。也可以使用 Stellarium 模拟。

^⑰ 影凌是指木卫的影子（准确的说是本影）投在木星视圆面上而本身又不在木星视圆面上，这时可以在木星表面看到一个小黑点。

椭球体形状。土星也是一颗气态的巨行星，主要由氢构成。它的平均密度仅有不到 0.7 g/cm^3 ，常被戏称为“能浮在水上的行星”。其内部结构、大气结构和云层结构与木星非常相似，在这里不再花篇幅详细介绍。

土星最著名的结构大概就是它的环系统了，美丽的光环让它成为了业余爱好者抢眼的观测目标和许多人心目中“行星”的代表。如图 4.27 所示，小型望远镜可见的、明亮的环主要是土星的 A 环（外侧）和 B 环（内侧），二者之被较宽的**卡西尼环缝**分隔。在 A 环内还有一些较小的环缝，如靠近外缘的**恩克环缝**。稳定的环缝被认为是与土星卫星轨道共振的结果。在 B 环的内侧是半透明的 C 环（又称**纱环**），在良好的天况下可以看到。除此之外，在 C 环内侧和 A 环外侧分别还有暗淡的 D 环和 F 环，以及更外侧极为稀薄的 G 环和 E 环，E 环延展到 8 倍土星半径以上的距离。它们已经不是业余设备的观测目标了。

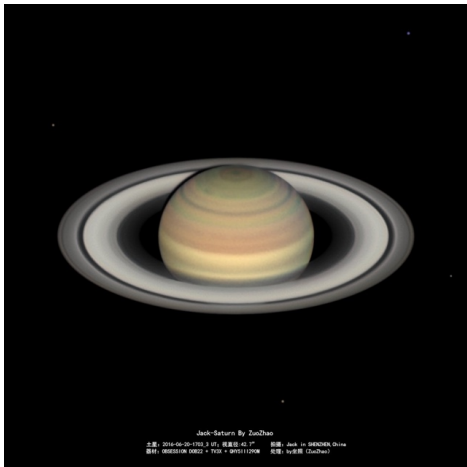


图 4.26 利用 22 英寸望远镜拍摄的土星，可以看到最粗的卡西尼缝、外缘的恩克缝、纱环（注意土星主体下侧靠近环处）和北极处的六边形风暴。图片来源：Jack、坐照（牧夫天文论坛）

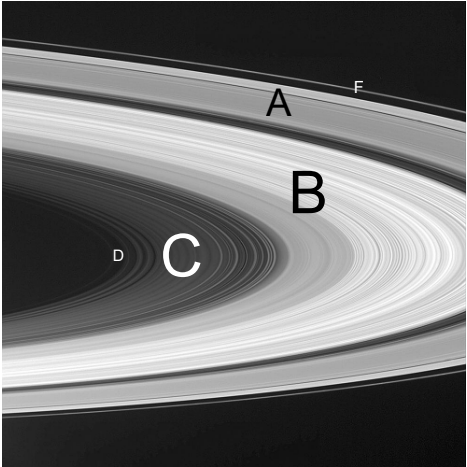


图 4.27 土星环的主要分区。图片来源：Wikipedia

土星环的主要成分是水冰的微粒，含有较少数的岩石残骸以及尘土，最薄处仅有约 10 m 厚，最厚处也不超过 1 km，总质量很小，只相当于地球南极冰盖质量的一半。关于土星环的成因，一种理论认为它是一颗卫星被粉碎（可能由于潮汐力或撞击）后形成的，另一种理论则认为它是土星形成时星云材料的残留物。

目前土星已经确认轨道的卫星有 82 颗^②，而且这个数字也将会不断增长。其中，土卫六 Titan 是土星系统中最大和太阳系中第二大的卫星，甚至比水星还要大。土卫

^② 更新至 2021 年 8 月。

六也是太阳系中已知唯一具有厚实大气的卫星，其大气的主要成分是氮气，地表气压达到 147 kPa，比地球表面的气压还要高。探测表明，土卫六表面有复杂的河流、海洋等结构，与地球十分类似，只不过其中流淌、循环的液体是甲烷而非水。土星的其他卫星都小得多，事实上，土卫六占到了环土星轨道上物质总质量的 90% 以上。

迄今为止，共有 4 枚人类探测器造访过土星。其中，在 1979 年、1980 年和 1981 年这连续的 3 年，先驱者 11 号、旅行者 1 号和旅行者 2 号先后飞掠了土星。2004 年，卡西尼号探测器进入了土星轨道，收集了土星及其卫星的大量数据，其携带的惠更斯号着陆器还成功降落在土卫六表面，创造了人类探测器着陆的最远天体记录。

土星是业余望远镜下最壮观的行星。用很小的望远镜就可以分辨出土星环，用口径 10 cm 以上的望远镜，在良好的大气条件下可以看到卡西尼环缝。土星的自转轴倾角约 27° ，因此随着土星的公转，环的倾角也会发生变化，在一些年份甚至会发生土星环正好以侧面对着地球而“消失”的现象。

土星表面也存在着一些云带结构，在良好的条件下可以看到。环和云带的更多细节，如恩克环缝、环绕北极的六边形风暴、内侧的 C 环等，可以通过摄影经过后期处理展现（如图 4.26）。土星的卫星是观测土星时有趣的“不速之客”，其中土卫六用最小的望远镜甚至双筒镜就能看到，用口径 15 cm 以上的望远镜，在合适的时候还能观测到土卫五、土卫三、土卫四、土卫八等多个其他卫星，其中土卫八由于两个半球表面反射率不同，在土星两侧时亮度可以相差 4 倍，非常特别。

■ 天王星和海王星

天王星与海王星是人类最后发现的两颗行星。它们位于太阳系寒冷、黑暗的边陲，亮度低且运行缓慢，因此直到近代人类进入望远镜时代后才被发现。其中，天王星于 1781 年由英国天文学家赫歇尔（William Herschel）用望远镜发现，用希腊神话中的第一代天神乌拉诺斯命名；海王星于 1864 年被观测到，用希腊神话中的海神尼普顿（波塞冬）命名。

一段广为传颂的历史是，海王星是由理论计算预言的，被称为“笔尖上发现的行星”。在那个物理学大发展的时代，人们凭借牛顿力学已经可以精确地预言行星的运动规律，然而天王星的视运动和理论预言相比存在着不小的误差，这说明可能存在一颗尚未被发现的行星，其引力影响着天王星的运动。英国的亚当斯（J. C. Adams）和法国的勒维耶（Urbain Le Verrier）分别做了严密的计算，最终 1846 年德国柏林天文台的加勒（J. G. Galle）利用勒维耶的预测发现了海王星，实际位置与理论计算相差不超过 1° ——牛顿力学也因此取得了自诞生以来最大的胜利。

天王星的轨道半长轴大约 19 AU，轨道周期约 84 年。天王星的自转轴几乎平行

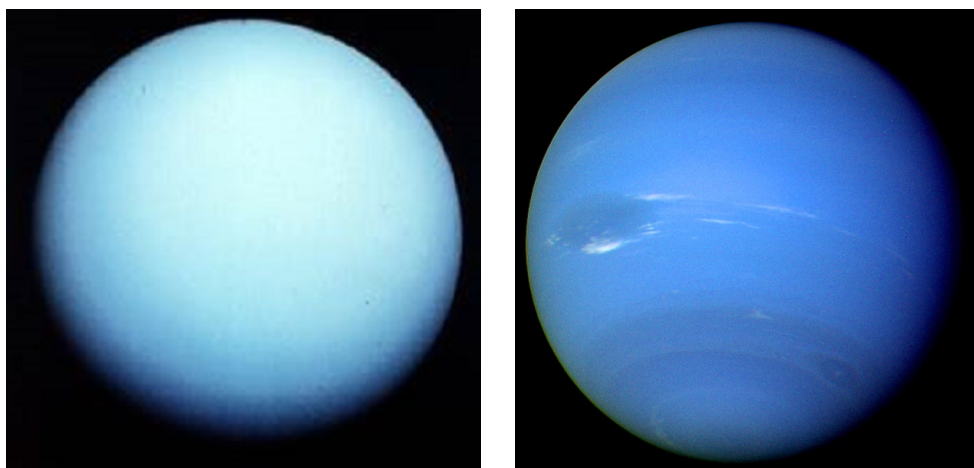


图 4.28 左：天王星；右：海王星。两者均由旅行者 2 号拍摄——换句话说，在地球上还没法看得这么清晰

于轨道面，被称为是“平躺着”自转的行星，这意味着天王星上绝大多数地区都有极昼和极夜现象。按照标准结构模型，天王星的结构从内向外分别是岩质硅酸盐的核，水冰、氨冰和甲烷冰组成的幔和外层由氢、氦、甲烷组成的大气。由于甲烷对红光的吸收，天王星呈现淡蓝绿色，其高层大气有少量稀疏的云带。天王星有暗淡的环，业余望远镜观测不到。

截至 2021 年 8 月，天王星已知的天然卫星有 27 颗。它们都很小且暗淡，最大的天卫三直径只有 1578 km，不及月球的一半。

海王星距离太阳更加遥远，轨道半长轴达到 30 AU，轨道周期长达 165 年。海王星的结构大体与天王星类似，由于一些未知的微量成分，海王星的表面看起来比天王星更蓝。海王星的气象活动远比天王星剧烈，高层大气分布着白色的云带，表面时常出现剧烈的反气旋系统——类似木星大红斑但寿命更短的大暗斑，它们是太阳系内已知最强的风暴，边缘风速可达 2100 km/h。海王星也有一个主要由冰晶组成的环系统，业余设备很难观测到。

截至 2021 年 8 月，海王星已知的天然卫星有 14 颗，其中最大的是直径 2700 km 的海卫一，质量占到了环海王星轨道上物体总质量的 99.5%。

前往天王星或海王星是一段漫长且昂贵的旅行。迄今为止，造访过它们的探测器只有旅行者 2 号（1986 年飞掠天王星，1989 年飞掠海王星）。这行文字写下时，所有未来飞掠天王星或海王星的探测任务都仍存在于计划中^②，即使如期执行，来自地球

^② 其中唯一涉及海王星的计划是我国的星际快车计划，其中的 IHP-2 探测器预计于 2024 年 ~ 2026 年发射，2038 年飞掠海王星。

的物体下一次造访这两个遥远的世界也要等到 2030 年以后了。

天王星的视星等最亮约 5.4 等，在环境好时可以由肉眼看到^{②④}。它的视直径大约 3 ~ 4 角秒，在业余望远镜中看不出任何特征，仅仅能分辨出视圆面，卫星也难以看到。海王星最亮只有 7.7 等，视直径更小，条件好时用业余望远镜能看到海卫一。虽然如此，在目镜中亲眼看到这两个“最远又最近”的天体，本身就是一种奇妙的体验。对于行星摄影爱好者，它们是很有挑战性的拍摄目标，网络上能找的优质照片寥寥无几^{②⑤}。

表 4.3 列出了各行星的轨道和物理参数，供读者查询比较。

表 4.3 各行星的轨道和物理参数表
(数据来源: Wikipedia, NASA)

参数 (单位)	水星	金星	火星	木星	土星	天王星	海王星
半长轴 (AU)	0.387	0.723	1.524	5.459	9.583	19.22	30.07
轨道离心率	0.206	0.007	0.093	0.049	0.057	0.046	0.009
轨道倾角 (°) ^{②⑥}	7	3.39	1.85	1.3	2.49	0.773	1.768
公转周期	88 d	224.7 d	687 d	11.86 a	29.46 a	84 a	164.8 a
会合周期 (d)	115.9	583.9	780	399	378.1	369.7	367.5
恒星日 (d) ^{②⑦}	58.6	243	1.026				
太阳日	176 d	117 d	1.028 d	9.926 h	10.54 h	17.24 h	16.11 h
自转轴倾角 (°) ^{②⑧}	0.034	177.4	25.2	3.13	26.7	97.8	28.3
质量 (地球 = 1)	0.055	0.815	0.107	317.8	95.2	14.54	17.15
平均直径 (km)	4880	12 104	6779	139 822	116 464	50 724	49 244
表面重力加速度 (地球 = 1)	0.38	0.904	0.379	2.53	1.07	0.886	1.14
平均密度 (g/cm ³)	5.43	5.24	3.934	1.326	0.687	1.27	1.64
表面气压 (kPa)	10 ⁻¹²	9.3 × 10 ³	0.636				
最亮星等	-2.48 ^{②⑨}	-4.92	-2.94	-2.94	-0.55	5.38	7.67

5 太阳系其他天体

在之前的几节中，我们介绍了太阳系中的太阳、月球、八大行星，这些是太阳系天体观测的常规的、主要的目标。在本章的最后一节，我们对之前还没有涉及到的矮行星、小行星、彗星、流星体进行简要的介绍；彗星与流星的详细知识，我们会在第

②④ 世界各地的古代观测者都看到过天王星，它甚至在公元前 128 年就出现在希腊天文学家喜帕恰斯的星表中。但由于运行过于缓慢，古人从未辨识出它是一颗行星。

②⑤ 英国著名行星摄影师 Damian Peach 拍摄的天王星和海王星：<http://www.damianpeach.com/uranep.htm>

②⑥ 轨道倾角是指行星公转轨道平面相对黄道面的夹角。

②⑦ 恒星日与太阳日的定义与第二章《时间、历法与星空文化》中针对地球的定义相同。恒星日可以理解为行星的实际自转周期，而太阳日可以理解为行星上日出日落的周期。类木行星表面不同位置的自转周期不同，这里采用的是雷达测定的内部磁场自转周期。类木行星的恒星日与太阳日差异不大，这里略去。d 是一日，等于 86400 秒；a 是一儒略年，等于 365.25 d。

②⑧ 自转轴倾角是自转轴相对公转轨道平面法线的夹角（严格地说这个数值是行星自转角动量与轨道角动量的矢量夹角，因此“逆向自转”时会出现大于 90° 的值）。

②⑨ 这是上合时的星等，实际观测不到。

五章《特殊天象》中加以讨论。

矮行星

在第四节中，我们提到了矮行星（dwarf planet）的由来——这不过是在新定义下被重新归类的一类天体。矮行星是具有行星级质量，但既不是行星，也不是卫星的太阳系天体——矮行星直接环绕着太阳，并且自身的引力足以使自己达成流体静力平衡的形状（一般是球体），但未能清除其邻近轨道上的其他小天体。

目前只有 5 颗：谷神星、冥王星、妊神星、鸟神星、阋（xi）神星。其中，谷神星位于火星和木星之间的小行星带上，利用小望远镜就能看到，不过其角直径不会超过 1″，其表面的细节难以分辨；而剩下的四颗矮行星则距离太阳非常遥远，亮度也十分黯淡，通常不是爱好者级别的观测目标。

冥王星显然是矮行星中最惹人关注的目标，它于 1930 年被美国天文学家汤博发现，一度被列为太阳系第九大行星，直到 2006 年才被降级。冥王星质量只有月球的 1/6，在公转时会周期性进入海王星轨道内侧，但二者轨道没有交点，所以不必担心海王冥王相撞。目前已知冥王星有 5 颗卫星，其中冥卫一卡戎与冥王星的质量中心不在任何一天体内部，因此有人认为冥王星更应该被视为一个联星系统。

2015 年 7 月 14 号，新视野号探测器（*New Horizons*）飞掠冥王星，为人类带来了自冥王星被发现以来最为清晰的影像资料——人类利用了整整 85 年的时间，终于把冥王星从底片上的一个像素点，变成了一个仿佛就在眼前的星球。



图 4.29 新视野号探测器拍摄的冥王星。图片来源：NASA

在矮行星中，冥王星、妊神星、鸟神星属于柯伊伯带（Kuiper belt）天体，它们均位于距离太阳 40 至 50 天文单位低倾角的轨道上。限于篇幅限制，我们在这里不对柯伊伯带进行过多介绍，有兴趣的读者可以查阅维基百科相关词条。

小行星（asteroid）是太阳系内类似行星环绕太阳运动，但体积和质量比行星小得多的天体。至 2021 年 8 月，小行星中心（Minor Planet Center, MPC）一共记录了约 112 万颗小行星，但这可能仅是所有小行星中的一小部分。根据估计，小行星的数目应该有数百万。目前人们正在对小行星进行重新分类，其中的一些大块头被重新定义为矮行星。

小行星

小行星的研究史从 18 世纪就开始了,当时有人根据提丢斯-波得定则^⑩推算出,在火星和木星之间存在着一颗未被发现的行星。1801 年,意大利天文学家皮亚齐观测到了一颗符合要求的天体,后经高斯精密计算轨道^⑪与奥伯斯重新发现,这颗天体被命名为谷神星。后来,在这个轨道半径处的天体被不断地发现,这个区域也被称为主小行星带,如插图中白色区域所示。目前已发现的 90% 的小行星属于主小行星带。

火星轨道内也存在着一定数目的小行星,这些小行星被统称为近地小行星 (NEA)——顾名思义,它们离地球距离比较近,甚至有可能对地球的安全造成威胁。目前世界上有不少的研究是针对这些近地小天体展开的,至少从目前的研究结果看,地球在短时间内是较为安全的。

小行星的个头普遍较小,只有少数小行星的直径大于 100 公里。一般来说,小行星看上去跟恒星没什么两样,连续观测后一般可以发现它的移动。小行星一般亮度较低:以较亮的 4 号小行星灶神星 (Vesta) 为例,其亮度在 5 ~ 8 等之间变化。

有一项重要的小行星观测项目是小行星掩星——通过观察小行星掩食背景恒星的现象,可以精确测定小行星轨道、直径等数据,是一项稍微进阶又很有科学意义的观测项目。读者可以参考这篇《如何进行掩星观测》,了解更多知识: <https://sunguoyou.lamost.org/yanxing.html>。

彗星与流星体

太阳系小天体还包括彗星和流星体,这里我们先粗略介绍这两种天体的性质。

彗星 (comet) 是主要由冰构成的太阳系小天体。彗星朝向太阳接近时会被加热并且开始释放气体,展示出壮观的大气现象,这些现象是由太阳辐射和太阳风共同对彗核作用造成的。彗星主要分为彗头、彗尾两部分,其中,彗头可以分为彗核和彗发两部分。彗

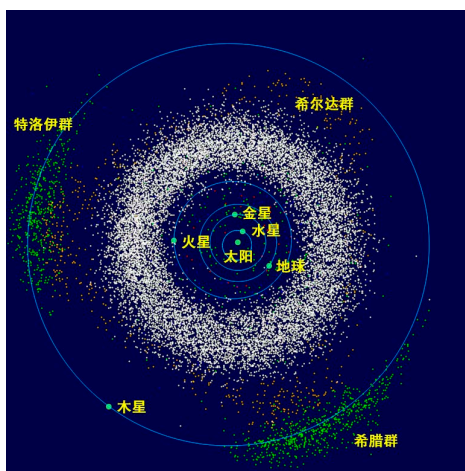


图 4.30 白色部分即为小行星带。图片来源: Wikipedia



图 4.31 彗星 C/2014 Q2 (Lovejoy), 结构清晰可辨。图片来源: Wikipedia

^⑩ 详见维基百科,这是一个关于行星到太阳距离的经验公式。

^⑪ 相传高斯在计算轨道时使用了他发明的最小二乘法,第一次向世界展示了这种数学武器的强大。

核是由松散的冰、尘埃和小岩石构成的，大小从数百米至数十公里不等。

而流星体（meteoroid）指的是太阳系内一些体积微小的、颗粒状的碎片。流星体进入地球（或其他行星）的大气层之后，在路径上发光并被看见的阶段被称为流星（meteor）。若许多流星来自相同的方向并在一段时间内相继出现，则称为流星雨（meteor shower）。在穿越过地球大气层并与地面撞击之后，未被毁坏的流星体（有时是小行星）的残余部分被称为陨石（meteorite）。北京天文馆中有相当多的陨石样品，感兴趣的读者可以前去观看，乃至触摸。

关于彗星和流星的具体性质和观测细节，我们会在第五章《特殊天象》中进一步讨论。

第五章 特殊天象

① 日食与月食

日食和月食是自古以来最为人类所重视的天文现象。在迷信统治的时代，人们总是认为日食和月食代表着不祥，被称为“天狗食日”“蟾蜍食月”。但事实上，日月食是一种正常的天文现象，科学家已经掌握了日月食的基本规律，并预测了未来百年内日食月食的时间。

整体来说，根据太阳、月球、地球三者不同的相对位置，日食有日全食、日偏食、日环食三类，月食有月全食、月偏食、半影月食三类。

日月食的成因可以用阳光下月球和地球的影子来说明，如图 5.1 和图 5.2 所示，当月亮的影子落在地球上，就发生了日食；当月亮进入地球的影子，就发生了月食。

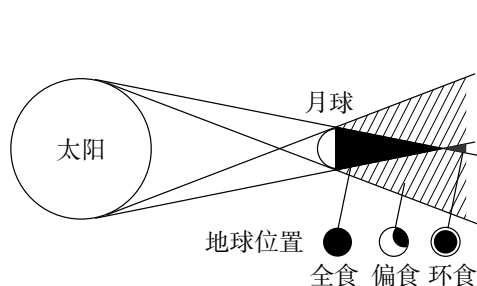


图 5.1 日食的成因

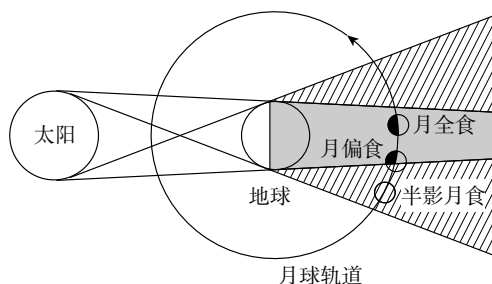


图 5.2 月食的成因

日食分全食、偏食、环食三种。图 5.1 的黑色区域中，月球完全遮挡了太阳的光线，称为本影区。斜线所示区域中月球只遮挡了太阳的部分光线，称为半影区。影锥尖向后延续的区域称为伪本影区。地球上位于本影区的人们看到的是日全食，在半影区看到的是日偏食，在伪本影区看到的是日环食。

每年全球一般都会发生至少 2 次日食，但由于月球的影锥很小，能看到日食的只

是地球上—部分区域。特别是环食带和全食带往往很窄，只有几十到几百公里宽。因此，对于地球上某个具体的地点来说，日全食和日环食是十分罕见的天象，同一地点两次看见日全食的间隔一般在 300 ~ 400 年左右。

如图 5.3 所示，日全食和日环食按时间的先后顺序分为 5 个阶段：初亏、食既（环食时也称环食始）、食甚、生光（环食时也称环食终）、复圆。日偏食只有初亏、食甚、复圆 3 个阶段。日食从初亏到复圆一般为一两个小时，而从食既到生光的全食阶段（或环食始到环食终的环食阶段）则只有几分钟的时间。当全食发生时，天空顿时黑暗，星斗出现，鸟兽惊飞，黑暗的太阳外围散发着银白色的光芒，这是太阳的高层大气——日冕层。而环食或偏食发生时，太阳仍然十分明亮，切不可用肉眼直接观测，也不要使用 X 光片、墨水盆等“土方法”，而应使用安全可靠的减光装置或利用投影法观测。

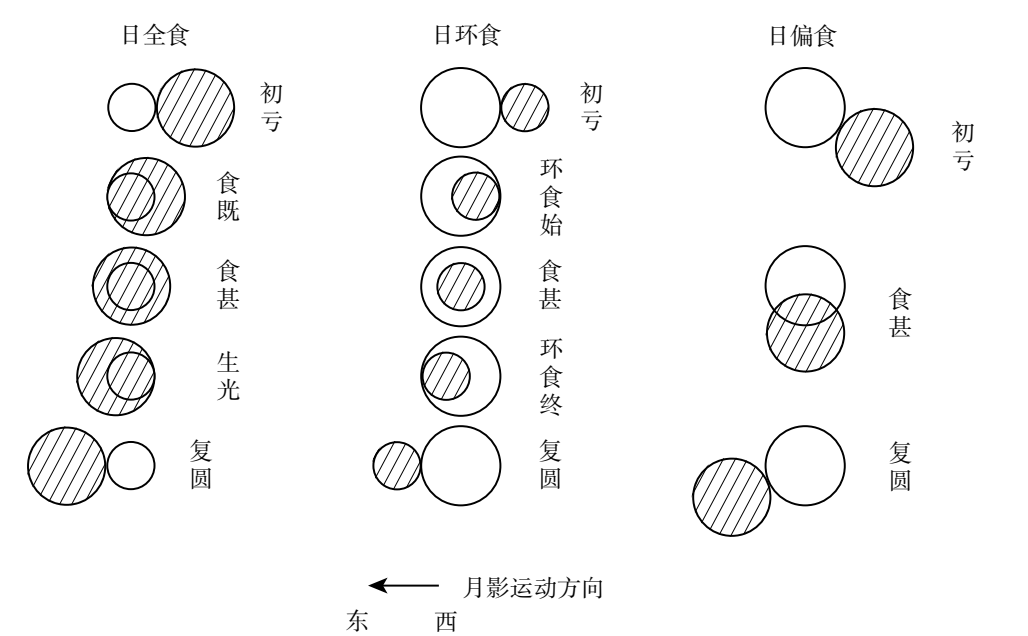


图 5.3 日食的过程。其中阴影表示月影。

月食分全食、偏食、半影月食三种——分别对应了月球全部处在地球本影、部分处在地球本影、全部处在地球半影三种情况。值得注意的是，即使在月全食时，仍有阳光经过地球大气的折射照亮月面。由于地球大气将大部分的波长较短的蓝紫光吸收和散射掉了，只有波长较长的红光通过大气层，因此，月全食时月球并不会消失，

而是呈现出神秘而优雅的古铜色，即人们眼中所谓的“红月亮”。当月球处在地球半影时，仍然有充足的阳光照射到月球表面，因此一般半影月食现象并不明显，仅是亮度略有降低，肉眼很难察觉。

由于地球的本影远比月球范围大，因此月食的持续时间较长，而且处于夜晚的半个地球上的人均可以观测到。如图 5.4 所示，月食的过程与日食类似，也有初亏、（食既）、食甚、（生光）、复圆 5 个（或 3 个）阶段。此处不再重复。

结合月相与日期的相关关系，月食总是发生在望（农历十五）附近，日食总是发生在朔（农历初一）附近。值得注意的是，由于地月日在三维空间内运动，而月亮的公转轨道（白道）和黄道并不在一个平面上，所以三者并不像图中的那样容易连成一条直线。只有月球运动到黄道与白道交点附近又逢朔望时，三者才会近似成为一条直线。否则，我们每月都会看到一次月食！

现代天文学对日食和月食进行预报计算可以达到分秒不差的精度。读者可以使用国家天文科学数据中心开发的“日食计算器”计算日食的时间、地点^①；NASA 则提供了直至 2050 年的日月食预报^②。值得一提的是，2035 年 9 月 2 日日全食的全食带经过北京城区，这是北京城 400 年来才有的机遇。

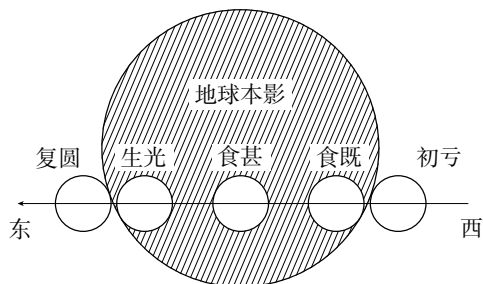


图 5.4 月食的过程

2 彗星

彗星是一种形态奇特的天体，大彗星的出现往往备受关注。如今，人们早已不再把彗星当作灾难的预兆，而是热衷于欣赏这种美丽而壮观的天象。彗星的基本知识在第四章《太阳系》已经有所介绍，下面将进一步详细阐述。

结构与轨道

彗星是由冰、尘埃、砂粒、石头等物质混合而成的小而不规则的天体。它们外观形态各不相同，但一般可以分为彗头和彗尾两部分。彗头由中央密集而明亮的彗核以及其雾状的包层——彗发组成。彗核通常很小，但彗星的质量都集中在彗核上。彗星代表性的长尾巴有时有不只一条可见，根据它们的形状和物质组成可以分为两种：尘

^① <https://nadc.china-vo.org/eclipse/>

^② <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/>

埃彗尾和离子彗尾。顾名思义，尘埃彗尾由尘埃颗粒组成，往往较短粗而呈弧形，而离子彗尾则主要由电离的离子和气体分子组成，几乎呈一条直线，沿背对太阳的方向延伸。

彗星通常起源于海王星外的柯伊伯带或更加遥远的奥尔特云，沿椭圆轨道绕日公转，其轨道离心率通常较大，远日点在冥王星之外。由于受到行星引力加速或其他原因，部分彗星的轨道甚至为抛物线或双曲线，若保持轨道不变则会离开太阳系并不再回归。也有一些短周期彗星（周期在 200 年以内），其轨道受到行星扰动而缩小。在超过 270 颗短周期彗星中，回归时通常肉眼可见的只有哈雷彗星。

当彗星离太阳很远时，彗核的温度很低，其中的物质都凝结成固态，彗星靠反射太阳光发光，非常暗淡。随着彗星越来越接近太阳，彗核表面变热，冰物质开始汽化，蒸发出去的气体分子携带着固体微粒在彗核表面形成彗发。同时，由于太阳的热辐射和太阳风的作用，明亮的彗尾从彗头延伸出来。因此，靠近太阳时彗星的大小和亮度都会增加。



图 5.5 新智慧星 C/2020 F3 (NEOWISE)，图中可见一条尘埃彗尾和两条离子彗尾。图片来源：APOD

发现与命名

400 年来，许多彗星都是由天文爱好者们用肉眼或望远镜一点一点地巡视天空而发现的。但几十年前，搭配了 CCD 的现代望远镜开始登上了彗星搜寻的舞台。它们可以更快速地扫视天空，并且还能够探测到更为暗弱的目标，这也使得天文爱好者发现彗星的数量变得越来越少。

为了更好地命名新发现的彗星，国际天文学联合会制定了统一的编号体系：以发现时的年份加上代表月份的大写字母^③作为编号，其后再以数字序号编排同一个半月内所发现的彗星。此外为方便识别彗星的状况，于编号前加上标记，比如 P 代表确认回归 1 次以上的短周期彗星，通常会在开头给以数字编号（如哈雷彗星为 1P/Halley 或 1P/1982 U1），C 代表长周期彗星（200 年周期以上，如海尔·波普彗星为 C/1995 O1）。彗星的名字则通常由发现者的名字或发现它的天文台/人造卫星命名。以 C/2013 R1(Lovejoy) 为例，它就是于 2013 年 9 月上半月第一颗被发现的彗星，是由业余天文

^③ A 代表一月上半月，B 代表一月下半月，C 代表二月上半月，除跳过字母 I 外依此类推

学家 Lovejoy 所发现的长周期彗星。C/2012 S1(ISON) 则是 2012 年 9 月使用国际科学光学监测网 (International Scientific Optical Network, 简称 ISON) 发现的。

■ 观测

大多数彗星在出现前毫无征兆, 而其亮度变化也往往和预期大不相同。比如 2013 年的 ISON 彗星曾令世界各地天文爱好者们无比期待, 甚至被冠以世纪彗星的称号。最初人们预测它的亮度可以达到-14 等, 但不幸的是, 它在经过近日点附近时解体了, 没能达到人们的预期。事实上, 彗星经过太阳的时候, 温度升高, 其中的气体蒸发逃逸, 彗星很可能会因此瓦解。所以, 对于大彗星的预报, 我们不要报以过高的期望。

彗星接近太阳时亮度增加, 在近日点前后亮度达到最大, 适合观测。因而那些明亮的彗星往往需要在日落后不久或日出前观测。大多数亮彗星适合于使用双筒望远镜观测, 因为双筒望远镜不但有一定的放大倍数和极限星等, 而且视场较大, 从中能够同时看到彗头和长长的彗尾。由于彗星是在不断移动的天体, 使用望远镜观测前, 要先查清楚彗星所在的大概位置。可以将彗星的信息导入 Stellarium 等星图软件中, 并查询彗星的实时位置。

国际小行星中心的网站上可以查到各种关于彗星的信息; 下面这个网址则列出了近期的彗星观测记录, 感兴趣的话可以参考: <https://www.cobs.si/>。

③ 流星雨

一个晴朗的夜晚, 你和往常一样凝视着夜空。突然, 平静的星空被一颗“落下的星星”打破了, 它像笔直的闪电, 寂静无声, 划过长空, 留下一道尾迹, 消失不见。那不是遥远的星星在流动, 而是地球大气层中转瞬即逝的光痕, 这就是**流星**。

星际空间有很多细小的流星体 (尘埃)。当流星体进入地球大气层, 它就会在高速运动中摩擦燃烧, 周围大气分子受热而发光, 形成流星。这些尘埃往往很小, 只有雪花或沙粒那么大。夜空的任何时刻都可能看到单个的流星, 这些不属于任何流星群的流星称为**偶发流星**。从星空某个辐射点向四周迸发, 隶属于某个流星群的流星称为**群内流星**。群内流星在一段时间内相继出现的现象就是浪漫的**流星雨**。

■ 流星雨的成因

大多数流星雨来自于彗星。如图 5.6 所示, 彗星一般以椭圆形轨道绕太阳公转, 当彗星到达近日点附近时, 彗星上的物质抛散开来, 形成一条尘埃带, 充满了整个彗星轨道。如果这条尘埃带恰好与地球公转轨道有交点, 那么当地球一年一度运行到交点位置时, 尘埃带中的许多细小尘埃就会进入地球大气层, 流星雨就出现了。由于地

球公转轨道与尘埃带的相对位置不变，我们每年都可以在同一个位置看到同一场流星雨，这就是流星雨大多在每年固定日期出现的原因。

当然，大多数彗星轨道和地球轨道都没有交点，因此能造成流星雨的彗星其实数量很少。当然也有少数彗星的轨道和地球有两个交点——这样一颗彗星就可以带来两场不同的流星雨，比如大名鼎鼎的哈雷彗星带来了宝瓶座 η 流星雨和猎户座流星雨。某些流星雨也可能是由近地小行星产生的，如双子座流星雨。

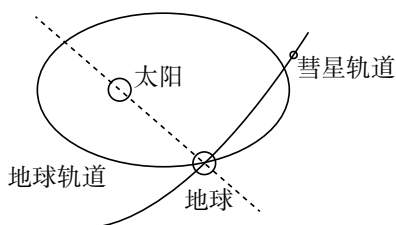


图 5.6 流星成因示意图

彗星形成的尘埃带有可能是均一的，也可能是不均匀的。因此，部分流星雨的流量每年十分稳定，比如英仙座流星雨；也有部分平时流量很低，但是爆发（地球运行到交点时恰好遇到流星体物质较多的区段）时流量突然上升，比如狮子座流星雨。

流星雨的辐射点与命名

流星雨最重要的特征，就是辐射点了。从图 5.7 中我们可以看到，如果把各流星轨迹反向延长，大致会聚集在一点——这个点就称为流星雨的辐射点。

由于形成流星雨的流星体运行在同一条轨道上，因此它们的运动方向是相互平行的，这就导致流星体在进入地球大气层后形成的流星轨迹也是相互平行的。不妨想象一下这个场景：两条平行的铁轨，由于透视原因，在远处交于同一点。而流星雨中各流星的轨迹，同样也是一些平行的线，只不过投射到二维的天空中，看起来交于同一点。这个点就是流星雨的辐射点。

根据流星雨辐射点所在的位置，我们可以对流星雨进行命名。常见命名方法是用辐射点所在位置的星座，例如双子座流星雨、狮子座流星雨。当然，有时候这样命名还不够精确，因为一个星座范围内可能会有多场流星雨。为避免这样的情况，也可以用辐射点附近的亮星命名。比如 5 月的宝瓶座流星雨，全名是宝瓶座 η 流星雨。^④



图 5.7 英仙座流星雨。图为不同时间多颗流星叠加而成。图片来源：APOD

^④ 有一些流星雨在活跃期辐射点过于靠近太阳，导致很难用光学方法观测，通常只能用射电方法观测到，称为白昼流星雨。如最大期在 6 月 7 日左右的白昼白羊座流星雨。

流星雨的流量

提到流星雨，不少读者可能都会想到影视剧或文学作品中流星像雨点一样纷纷洒落的情景。但实际上，绝大部分流星雨的流量都达不到这种等级。即使是较大的流星雨，理想情况下流星的数量也只有每小时百颗左右。

怎样准确表示一场流星雨的流量呢？我们使用**天顶每时出现率（ZHR）**衡量流星雨的流量大小。天顶每时出现率是指在极限星等为 6.5 等，辐射点处于天顶，视野没有被遮挡的理想情况下，一个观测者每小时可以观测到的流星的数量——简单来说，就是观测条件最好的情况下肉眼能看到的每小时的流星数目。因此一般情况下，由于观测条件限制，实际上看到的流星数量，都会低于这个值^⑤。

对于一场流星雨来说，随着时间推移，它的流量也在变化。流量最大的时段称为流星雨的**极大期**，而存在流星雨流量的整个时段都称为流星雨的**活跃期**。图 5.8 显示了 2020 年双子座流星雨 ZHR 随时间的变化。

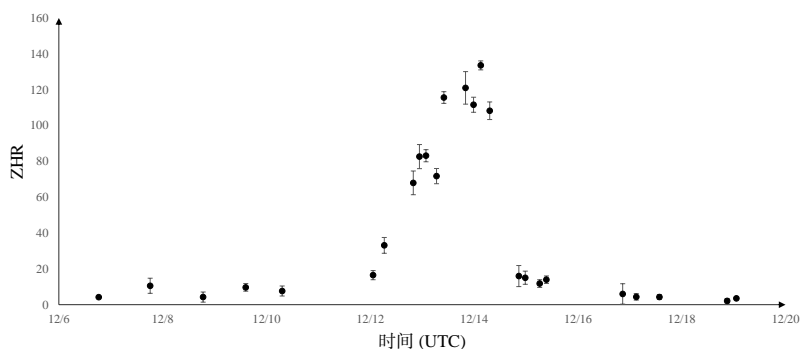


图 5.8 2020 年双子座流星雨 ZHR 图示

流星雨观测并没有所谓“哪一天开始”，或者“几点开始”的说法，在长达几天甚至一个月的活跃期内，均有可能看到流星群中的流星；而每场流星雨的极大期持续时间也不甚相同——短则数小时长则一两日。一般而言，最适合开展观测的时间，是极大期前后的夜间。

不同流星雨的流量差异很大。一般来说，只有 ZHR 大于 50 的流星雨才适合一般的天文爱好者特意去观看，但符合这一要求的流星雨并不是很多，表 5.1 列出了每年较大的流星雨。而对于入门爱好者来说，则只推荐象限仪座流星雨、英仙座流星雨、双子座流星雨这三大流星雨，它们的流量较大而且较稳定，ZHR 均可达到一百上下，城市中也都可以观测到；而其他流星雨则建议只在野外较好的环境下观测。读者可以查

^⑤ 当辐射点位于地平线上时，视野无遮挡的观测者每小时观测到的流星数量 $N = \text{ZHR} \cdot \sin(H) / r^{6.5-m}$ ，其中 H 为辐射点的地平高度； r 是流星雨的数量指数，通常介于 2.0 到 3.5 之间，衡量不同亮度的流星数量的差异程度； m 为观测地的极限星等。

询国际流星组织（IMO）每年发布的流星雨日历，其中给出了每年各流星雨的极大期时间、ZHR 等信息。链接为：<https://www.imo.net/resources/calendar/>

表 5.1 每年较大的流星雨列表

名称	极大日期	ZHR	注释
象限仪座流星雨	1 月 3 日前后	120 左右	北半球三大流星雨之一
宝瓶座 η 流星雨	5 月 5 日前后	60 左右	春季流量最大的流星雨，来自哈雷彗星
英仙座流星雨	8 月 12 日前后	90 左右	北半球三大流星雨之一，火流星较多
狮子座流星雨	11 月 17 日前后	15 左右	平时不适合观测，爆发时 ZHR 达 1000 以上
双子座流星雨	12 月 14 日前后	120 左右	北半球三大流星雨之一

流星雨的观测

在讲述流星雨的观测方式之前，读者首先需要清楚，一般情况下，即使是最大的流星雨，流量也不过每小时百余颗，不可能出现影视作品中描述的流星像雨点一样纷纷落下的浪漫场景，而且流星会毫无预兆地在天上任何地方出现，每颗流星出现的时间相当短暂，其出现时刻和位置也无法预知。因此，观测流星雨需要一定的耐心。

观测方式 流星雨观测应当说是所有天文现象中最为“亲民”的一项。大多情况下，最适合的观测方式，是目视观测。^⑥

当流星雨来临时，你不需要相机、望远镜等设备，只需要一双明亮的眼睛，以及一片黑暗的星空。选择肉眼观测，并不是没有设备的无奈之举。相反，肉眼观测视野广阔、分辨能力强，而且快速反应能力优秀，这几项优势都非常适合流星观测的要求。同时，亮度、颜色、路径等等都是需要观测的内容。每颗流星速度很快，且出现的时刻、位置无法预知，听到其他人欢呼声时往往已经看不到了。^⑦

观测时间与地点 对于观赏流星雨（而非研究）而言，最好选择极大期附近的夜晚进行观测。还要注意月相对观测流星雨的影响，在有月光影响的情况下，可见流星的数量会大大减少。同时，可见流星数量与辐射点高度有关，辐射点越高，可见流星越多。可以使用“天文通”微信小程序的“流星雨可见数计算”功能预测某一时间可见流星的数量。

与一般的天文观测相同，观测流星雨需要晴朗无云、远离光污染的黑暗环境。对城市里的观测者来说，能看到流星的数目就往往少得可怜。对于北京大学校内的观测者，受到城市光污染的影响，即使是流量较大的双子座流星雨，每小时最多也只能看

^⑥ 流星雨标准观测是按照国际流星组织（IMO）规定的方法对流星、流星雨进行观测，得到可以用于进行科学分析的数据的观测方法。感兴趣的同学可以参考 <http://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=39527977> 与 <http://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=39849577>。

^⑦ 除了目视观测以外，流星雨观测还有照相、摄像、无线电监测、望远镜确定辐射点、雷达监测、光谱分析等，这些观测方式大多为了满足专门的目的，此处不作介绍。在没有特殊目的情况下，最适合的观测方式是肉眼观测。

到 10 颗左右的流星。

观测姿势 观测流星雨时，最佳的观测姿势是躺下观测，这是为了将肉眼观测视野广阔的优势发挥到极致，同时也可以保护颈椎。对于初学者来说，可以根据星图，辨识明亮的背景恒星，判断辐射点的大致位置，此后将视线集中在辐射点附近区域。但不要盯着辐射点看，也不要盯着某颗恒星，而是要把注意力集中在整个区域。

火流星与陨石

进入大气层的流星体如果比较大，就会出现一个较亮的流星。如果亮于 -5 等，那么称之为**火流星**。特别亮的火流星可达 -9 等，其视面大小甚至相当于太阳和月亮，可以照出地面景物的影子。极个别更大的流星体在落地之前没有被完全烧毁，剩余的石块就会砸到地面，称为**陨石**。这些“天外来客”携带着太阳系天体形成和演化的丰富信息，对它们的分析将有助于探求太阳系演化的奥秘。

4 人造卫星

日落之后两个小时、日出之前两个小时左右的时间内，地面已经没有阳光照射，但高空还有阳光照射。如果有人造卫星从天空经过，卫星的外壳和太阳能电池板就能反射太阳光到地面，被人们看见。

人造卫星是像恒星一样的光点，在恒星背景上缓缓移动，绝大多数情况不会闪光，可以很容易和飞机区分开。卫星有时会因为翻滚而闪亮一下，或者因为进入地球的阴影中而突然变暗。一些人造卫星有时比最亮的恒星还亮，肉眼可以轻易看到，例如国际空间站过境时星等可高达 -4

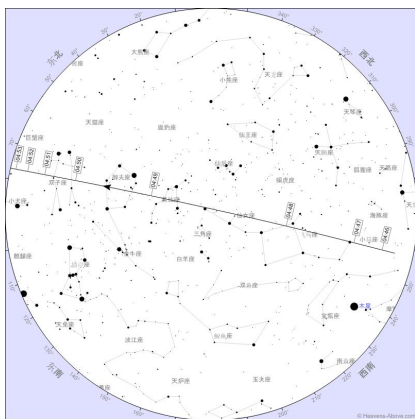


图 5.9 天宫号空间站过境星图

等。除了国际空间站，中国的天宫号空间站、哈勃望远镜等人造卫星都可以用肉眼看到，值得大家尝试。图 5.9 显示了 2021 年 8 月 10 日的一次天宫号空间站于北京大学上空过境的路径。

有时，人造卫星会从日面或月面前经过，发生人造卫星凌日、凌月的现象。此时可以看到卫星在日面或月面前一闪而过。由于人造卫星移动速度较快，凌食的持续时间一般不超过 1 秒，甚至不到半秒，适合用高帧率的相机拍摄。

需要注意的是，与其他天体相比，人造卫星离我们很近，因此它们的过境时间和方位与观测者所在的位置密切相关。人造卫星的过境信息可以通过这个网站查询：

<https://heavens-above.com/>。只要在其中输入观测地的位置信息，就可以查询到近期过境的所有人造卫星，网站会详细给出它们的出现时间、坐标、亮度等信息，还可以查看人造卫星所经过天区的星图（例如图 5.9）。使用“天文通”微信小程序也可以方便地查询中国空间站、国际空间站等较明亮人造卫星的过境信息，还可以计算中国空间站、国际空间站凌掩日月、行星和亮恒星事件的信息。

补充阅读

极光

极光的英文名称为 Aurora，取自罗马神话中黎明女神之名。因此，极光有时也被音译为奥萝拉、欧若拉等。由于与神话故事相关，极光也和流星类似，成为了一种常被赋予文学含义的浪漫性天文现象。



2015 年 3 月瑞典 Kiruna 的北极光。图片来源：APOD

顾名思义，极光发生的地点位主要是靠近两极的高纬度地区，因此又分为北极光、南极光两类。由于南极附近是无人居住的广阔南极洲，因此大多数值得观测的极光都是北极光。本节接下来探讨的，若不做特殊说明，均为北极光。

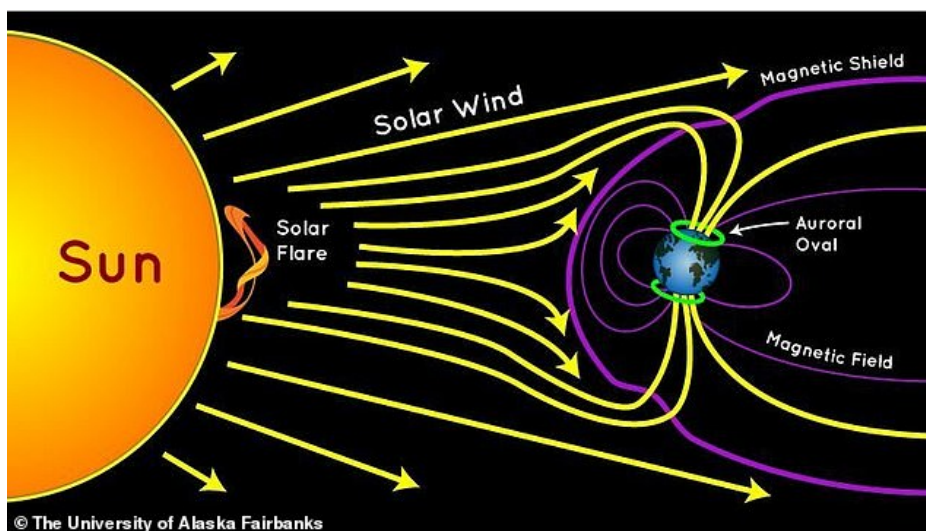
■ 极光的产生原理

简单地说，极光来源于太阳发射的带电粒子。当这些带电粒子（也就是“太阳风”的成分）进入地球大气层，与地球大气层中的气体分子相互碰撞之后，气体分子受到激发而发光，从而产生了极光现象。

根据极光的产生原理，极光的颜色往往取决于带电粒子碰撞的气体分子类型。一般来说，最常见的极光是绿色的，这也是氧分子所带来的极光。此外，还有红色、蓝色甚至紫色极光，这与发光分子，还有极光发生高度等有关。

有人认为，极光发生在地球大气层以内，不能称之为天文现象。但是根据其发生的原理来看，实际上极光反映了太阳活动的强弱，和流星一样，是展现在地球表面的太阳系景观。

由于太阳光是近似直线传播的，因此低纬度单位地表接受的太阳光多于高纬度，气温也相对更高，这是众所周知的常识。然而，与之相反，由于地球磁场的存在，带电粒子并不像太阳光一样可以直线传播，而是沿着磁力线运动，只有在地磁场磁极附近的地区才能接近地面，接触到大气层，进而产生极光。



极光原理示意图。图片来源：NASA

有趣的一点是，地球的地磁两极和地理两极并不是重合的，也就是说，使用地理纬度并不能很好地表述一个地点是否适合观测极光。为了描述一个地点相对地球磁极的位置，我们类比纬度，引入“磁纬”的概念，将磁纬 90° 定为地球的两个磁极而不是地理南北极，使用磁纬表示某地离磁极的距离。由于地磁南极大致位于加拿大北部，因此北美的观测者相对较为幸运，他们所在的地点的磁纬往往会比地理纬度高 $5 \sim 10^\circ$ ；而我国观测者相比之下就显得非常不幸——磁纬往往低于地理纬度。例如，美国五大湖地区看到极光的可能性，就远超同纬度的我国东北地区。

■ 极光的观测

地点 显然，足够高的磁纬是一个重要的考虑指标。一般来说，磁纬 $60\text{--}65^\circ$ 的地方是最适合观测极光的位置。世界范围内的极光景观区域主要有北欧的斯堪的纳维亚半岛、冰岛、格陵兰岛南部，以及北美的阿拉斯加、加拿大西北部等地区。当然，

如果地磁暴足够强，极光的范围也有可能更加南移——例如北美的五大湖，甚至波士顿、纽约等地均有可能见到极光。对国内观测者来说，最好的地方，当然是黑龙江省漠河（磁纬 47 度）。当然，新疆北部（阿勒泰，43 度）、内蒙古东北部（呼伦贝尔，43 度）等地区也有观测极光的可能。不过注意，到达高纬度地区观测极光时最好是冬天——因为夏季的白昼持续时间过长。

时间 既然极光产生于太阳活动，那么太阳活动强烈的时段也是最适合观测极光的时段——从长时间角度看，太阳活动大致有 11 年的周期；但是短时间的太阳活动则是有高有低。幸运的是，人类已有一些监测太阳活动的手段，例如 NASA 的 ACE（Advanced Composition Explorer）卫星。

太阳活动强度（或者准确的说，地磁扰动强度）以多种形式表示，其中一种就是 Kp 指数——该指数取值范围是 0 到 9，数值越高，就表示地磁扰动越强。对于欧洲、北美或者澳大利亚地区，若想了解即时的地磁扰动强度，可以使用这一网站查询：

<https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>

参考地图上的 Kp 划线，你可以大致了解自己所在地点大约需要多高的 Kp 值才可能遇见极光，然后再查阅近期的 Kp 预报，安排自己的观测计划。若不习惯英文界面，也可以查找中国气象局国家卫星气象中心的预报。

与流星观测一样，极光预报也只能给出“某一时段极光发生可能性较大”的结论，至于在哪一时刻哪一位置会出现极光，就难以准确预测了。当然，要注意的是，与流星不同，极光并不会出现在天空中的任何一个位置——既然极光出现在地面上空一两百千米的大气层内，那么如果你没有处在磁纬极高的地区，你只能在北边地平线上空找到它的踪迹。当然，如果你身处位置的磁纬足够高，那漫天极光铺满苍穹的景象，也就值得你去探寻了。

第六章 恒星

1 恒星概论

“天阶夜色凉如水，卧看牵牛织女星。”每当夜幕降临，天气晴好时，闪烁的繁星格外引人注目。抬头仰望，众星之中，除少数几个行星以外，绝大多数都是恒星——它们毫无疑问是夜空的主角，也就是通常大家口中所说的“星星”。恒星中的“恒”字意指星座或星官排列成的形象亘古不变，仿佛是永恒的。

但是，你真的了解你口中所说的这个“星星”吗？

恒星的亮度与星等

在第一章第3节中，我们粗略地介绍过有关恒星的亮度和星等的基本概念。星等是表示恒星（乃至其他天体）亮度最常用的方法，因此我们有必要进一步了解它。

恒星的亮度定义为恒星在观测点与视线垂直的平面上所产生的照度。照度是一个物理量（国际单位：勒克斯，lx），可以顾名思义地理解为“物体被光源照亮的程度”。从最朴素的生活经验出发去理解：当光源固定不变时，显然当你离它越远，你感受到的亮度就越低，因此照度变小；当你和光源距离一定时，减小光源的发光强度，你感受到的亮度也越低，因此照度也变小。因此通常来讲，光源自身的发光强度和观察者到光源的距离是影响照度的两个最主要的因素。关于发光强度和照度的详细内容，参见本章最后的补充阅读。

恒星距离我们非常遥远，星光传到地球上，照度非常微弱。因此虽然我们确实使用照度来定义恒星的亮度，但如果用国际单位勒克斯来描述，恐怕小数点后要带许多个0，显然是不方便的。天文学上沿用古希腊人的做法，使用（视）星等的概念：1等星要比6等星亮恰好100倍，并且星等之间是等差数列，亮度之间是等比数列。^①定义星等之间为等差数列、亮度之间为等比数列，主要是考虑到人眼的生理特性，即对亮度的强弱感受如同人耳对声音的强弱感受一样，服从对数规律。

^① 第一章中也提到过，这个定义最早来自古希腊天文学家喜帕恰斯（Hipparchus），他把自己编制的星表中的1022颗恒星按照亮度划分为6个等级。1850年英国天文学家普森（N. R. Pogson）发现1等星平均要比6等星亮100倍。

天体的星等与亮度之间存在数学关系。假设有两颗恒星，其亮度分别为 E 、 E_0 ，星等分别为 m 、 m_0 ，可以证明它们之间满足关系：

$$m - m_0 = -2.5 \lg \frac{E}{E_0} \tag{①}$$

式 ① 就是著名的普森公式。这表明，只要我们有明确的一颗星的星等和它的标准亮度（例如 0 等星），我们就可以用所测得的其他天体的亮度 E ，计算其星等 m 。

但是显然，仅仅通过亮度或（视）星等是无法比较恒星固有的真实发光本领的，因为我们没有考虑到天体与地球之间距离的因素。因此，为了比较不同恒星的真实发光能力，必须设想把它们都移到相同的距离 D 上进行比较。天文学上取标准距离 $D = 10$ 秒差距（pc） ≈ 32.6 光年，在标准距离处的恒星的亮度称为真亮度②（绝对亮度），对应的星等称为绝对星等，通常用大写字母 M 表示。

设恒星到地球的距离为 d （以秒差距为单位），视星等为 m ，绝对星等为 M ，可以证明它们之间满足关系：

$$m - M = 5 \lg d - 5 \tag{②}$$

视星等和绝对星等之差 $m - M$ 通常也被称为距离模数（distance modulus）。

式 ① 和式 ② 的推导详见本章补充阅读，这里不再展开。

表 6.1 列出了一些常见亮星的数据，这些星因视亮度雄踞全天而闻名。

表 6.1 一些常见亮星的数据（历元 J2000.0）。数据来源：《天文学新概论（第五版）》

星名		视星等	绝对星等	距离（光年）	赤经	赤纬
中文名	拜耳命名法					
太阳	—	-26.74	4.83	—	—	—
天狼	大犬座 α	-1.46	1.41	8.6	6 ^h 45 ^m .2	-16°43′
大角	牧夫座 α	-0.04	-0.2	36.7	14 ^h 15 ^m .6	19°11′
五车二	御夫座 α	0.08	-0.6	42	5 ^h 16 ^m .7	46°0′
参宿七	猎户座 β	0.12	-7.0	770	5 ^h 14 ^m .5	-8°12′

可以看到，由于太阳非常靠近地球，因此从地球上看来，它是天空中最亮的天体；但和全宇宙中的那些亮星相比，太阳的真实发光本领还是略逊一筹。

② 其实天文学中更常提到的物理量是光度。恒星的辐射能力应当计及包括光学波段在内的整个电磁波谱的辐射总量，称为恒星辐射总功率，单位为瓦特（W），天文学上称之为光度，用 L 表示。此外，太阳光度 $L_{\odot} \approx 3.8 \times 10^{26}$ W 经常被用作度量其他天体光度的单位。与光度相对应的星等称为（绝对）热星等，不能直接由观测来确定，而需结合理论计算求得。当我们提到绝对星等、光度、真亮度等物理量时，通常都是为了反映恒星的真实发光/辐射本领，因此它们经常被混用。

恒星光谱型、温度与赫罗图

抬头仰望，星海茫茫，光点无数，但它们呈现出的颜色似乎并不相同——有的发出幽幽的蓝光，有的闪耀热情的红光，还有的呈现纯洁的白光。这些都和恒星的光谱型（spectral class）有关。

什么是光谱？17 世纪以前，人们一直以为白色是最单纯的颜色，太阳发出的白光照亮地球，使万物生辉。然而 1666 年，牛顿（Isaac Newton）发现当太阳光通过一块三棱镜时，由空气-玻璃-空气两次界面的折射，白色的自然光就分成了多种颜色的影带，按红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫的顺序，也就是波长从大到小、频率从小到大的顺序排列，牛顿称之为光谱（spectrum），这种现象叫光的色散。这说明，白光实际上是“最不纯的光”，是由各种色光混合而成的。

理论上，如果把一块尺寸足够大的棱镜放在望远镜物镜前端（称为物端棱镜），就可以得到恒星的光谱，即分成各种频率的恒星辐射；事实上，早期的恒星分光技术就是这样做的。当然，现在已经有了更加先进和精确的天体摄谱仪。恒星的光谱分析已经在现代天文学中占据了重要地位。可以认为，光谱就是恒星的“身份证”，通过测定恒星光谱，我们就可以定性甚至定量地确定恒星的化学成分，直接或间接地得知恒星的表面温度、直径、质量、磁场等各种信息。

正文里我们并不打算展开介绍恒星光谱形成背后的具体机理，对此感兴趣的读者可以参考本章最后的补充阅读，这里只介绍一些重要结论。

根据恒星的光谱，可以把恒星分为若干种光谱型，最常见的就是哈佛分类法：每种光谱型用拉丁字母表示，分为 O、B、A、F、G、K、M 七个基本光谱型；从 O 到 M 的光谱型系列，是恒星表面温度从高到低、颜色从蓝到红的系列。^③ 在 G 型和 K 型后还有 3 个亚型 S、R、N，总的光谱型序列如图 6.1 所示。



图 6.1 恒星的光谱型序列（哈佛分类法）

据说调皮的美国大学生为了应试还编了一句俏皮话：

^③ 读者可能对于为什么冠以“哈佛”之名和光谱型字母以这种无厘头的乱序排列感到疑惑，实际上这是有历史渊源的。19 世纪末到 20 世纪初，美国哈佛大学天文台（Harvard College Observatory, HCO）利用物端棱镜拍摄得到了大量恒星的光谱，并对它们进行了分类。起初，恒星光谱是根据氢原子的某些吸收线的强度分类的，并按拉丁字母的顺序标记；A 型星具有最强的氢线，B 型星的氢线比 A 型星稍弱……以此类推。但是后来人们意识到，光谱型主要由恒星的有效温度（定义见补充阅读）决定，因此将光谱型按温度顺序排列更恰当。然而，氢线在某个有效温度范围恒星的光谱中最强，在较高和较低温度下都稍弱，于是按照有效温度从高到低重排后，字母次序自然就乱了。

Oh, Be A Fine Guy / Girl, Kiss Me! Right Now, Smack!

其各单词首字母恰好构成光谱型序列。
各光谱型的主要特征、恒星颜色和恒星表面有效温度如表 6.2 所示。

表 6.2 恒星的光谱型及其性质

光谱型	光谱主要特征	颜色	表面温度 (K)	举例
O	一次电离 He 线, 强紫外连续谱	蓝	> 25 000	参宿三 (猎户座 δ)
B	中性 He 的吸收线	蓝白	25 000 ~ 11 000	参宿七 (猎户座 β)
A	强 H 线	白	11 000 ~ 7500	织女一 (天琴座 α)
F	中性金属线开始显现	黄白	7500 ~ 6000	南河三 (小犬座 α)
G	强重元素一次电离线和中性金属线	黄	6000 ~ 5000	太阳
K	金属线为主, 弱的蓝色连续谱	橙	5000 ~ 3500	大角 (牧夫座 α)
M	强 TiO 分子带	红	< 3500	参宿四 (猎户座 α)

可见, 发出冷色调的蓝色恒星其表面温度反而很高, 呈现暖色调的红色恒星其表面温度反而很低, 希望读者阅读完本小节后可以记住这一点, 参加学会观测的时候可能会问到哦。

由于历史的原因, 人们习惯地称呼 O、B、A 型星为**早型星**, F、G 型星为**中型星**, K、M 型星为**晚型星**, 意为与恒星的演化年龄有关, 虽然现在我们知道这种叫法含义上并不十分准确, 光谱型顺序并不与恒星的演化年龄必然地相对应。

20 世纪初, 丹麦天文学家赫茨普龙 (Ejnar Hertzsprung) 和美国天文学家罗素 (Henry N. Russell) 各自独立提出恒星的光谱型和光度 (绝对星等) 之间存在关系, 并以图来表示, 称为**赫罗图** (H-R diagram)。典型的赫罗图如图 6.2。

可以看到, 赫罗图以光谱型 (或有效温度) 为横坐标, 以绝对星等 (或光度) 为纵坐标, 把所有已知光谱型和绝对星等的星点在图上, 每个点代表一颗星。另外, 恒星的等半径基准线已经在图中画出 (以太阳半径为单位)。

我们发现, 绝大多数星 (90% 以上) 都落在从左上延伸到右下的带状区域, 这个序列称为**主星序** (main sequence), 落在这里的星就称为**主序星** (main sequence star, V)。④ 绝大多数肉眼能看到的恒星都是主序星, 例如太阳就是一颗十分标准的主序星 (已标在图 6.2 中)。

④ 这里的罗马数字指的是**光度型** (luminosity class), 感兴趣的读者可以查阅 **MK 系统** (Morgan-Keenan system)。

我们还发现，右上角有一个点群，这些星温度偏低、颜色偏红，但是光度却很大。按照物理学的自然推论，这些星的体积必然都很大。^⑤ 这里的星绝大多数都是超巨星（I）、亮巨星（II）、巨星（III）、次巨星（IV）等。

最后，我们发现左下角也有一个点群，温度偏高，颜色偏白，光度却很小，这一定是体积很小的星。这里的星绝大多数都是次矮星（VI）、白矮星（VII）等。

赫罗图简单明了，却有着极其深刻的含义，是现代天文学中非常重要的图表。尤其是在讨论恒星演化时，赫罗图可以发挥很大的作用。

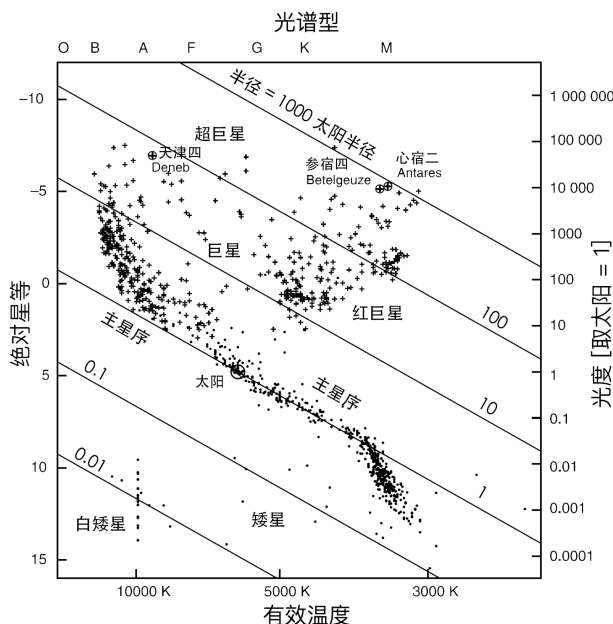


图 6.2 赫罗图。图片来源：Fundamental Astronomy, 6th edition

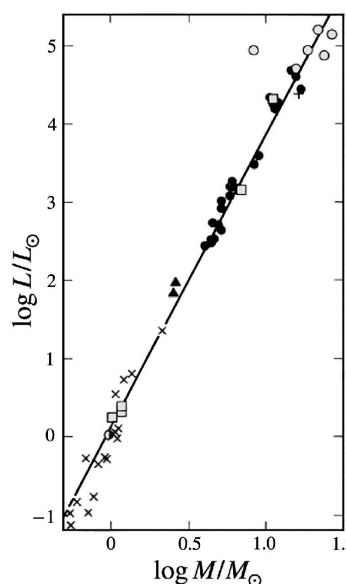


图 6.3 质光关系。图片来源：Fundamental Astronomy, 6th edition

恒星的質量与寿命

质量是与恒星内部物理性质和恒星演化历程有关的决定性参数，是恒星最重要的物理量之一。然而，恒星的质量却非常难以测定，并且测量的可靠性相比其他量来说也并不理想。

目前，常用的测定恒星质量的方法有两种：

1. 基于物理双星的动力学方法

^⑤ 至于具体为什么，感兴趣的读者可以查阅斯特藩-玻尔兹曼定律的相关内容，在本章补充阅读中亦有提到。

迄今为止除太阳外，能够进行质量的直接测定的只有一部分物理双星。^⑥

首先，我们要测得双星系统整体的质量，主要原理是开普勒第三定律^⑦：

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(M_1 + M_2)}{4\pi^2}$$

其中， M_1 和 M_2 分别是主星和伴星的质量， a 是伴星绕主星运动的轨道半长轴， T 是绕转周期， G 是万有引力常数。距离和时间总是相对好测的，并且通常测得较为准确。

接下来，我们需要获得两个子星的质量比 M_1/M_2 。常用的方法是光谱分析法：对双星系统进行光谱分析，根据它们运转时的多普勒效应求得两星视向运动速度曲线，从而求出 M_1/M_2 。

得知了质量和、质量比，两个子星的质量就可以求出了。这种方法测得的质量比较可靠。

2. 质光关系法（※）

宇宙中很多恒星都是单独存在的，因此无法通过动力学方法直接求出其质量。然而，大量基于双星的观测表明：主序星的质量与光度之间存在较好的正相关，这就是著名的质光关系（mass-luminosity relation），如图 6.3 所示。

通常估算中，我们可以认为主序星的光度 L 与质量 M 之间近似满足：

$$L \propto M^{3.5 \sim 4} \quad \text{③}$$

虽然质光关系只是一种近似关系，但它仍然提供了一个估计恒星质量的重要方法。

可以看到，恒星的质量差别较小：大的为太阳质量的百倍，小的为太阳质量的十几分之一。目前已知在银河系内，质量最大的恒星是位于仙后座的 HD 15558 A，为太阳质量的 152 倍。^⑧ 物理学上可以证明，如果一颗星的质量小于 0.08 个太阳质量，就不能够维持天体内的氢聚变，它便失去了作为恒星的资格，在天文学上称为亚恒星^⑨（substellar object）。

然而，恒星的发光本领（或光度）差别却特别大：大的比太阳大百万倍，小的只有太阳的万分之一。目前已知在银河系内，光度最大的恒星是离我们 26 000 光年的 G0.238-0.071，为太阳光度的约 500 万倍，绝对星等在 -12 左右。^⑩

要知道，恒星的固有发光本领是靠核聚变（见下一小节）来换取的，恒星质量越大，需要用以抵抗引力的热压力越大，就需要内核温度越高，聚变速率也就越快。恒

⑥ 关于双星的具体内容，详见本章第 4 节。

⑦ 高中时，我们都学过开普勒第三定律，详见人教版高中物理（2019 年新版）必修第二册第七章万有引力与宇宙航行。但是高中时老师会告诉你 a^3/T^2 的比值 k 对于所有行星都相等，只与中心天体的质量有关。但实际上这是不准确的。对于太阳系天体，行星们的质量都远远小于太阳质量，从而可以近似地认为比值 k 只与太阳质量有关。但是对于质量相差不大的双星系统，就必须考虑二体修正。

⑧ 更多详见维基百科词条：巨大质量恒星列表 (https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_massive_stars)。

⑨ 我们所熟知的褐矮星就是最常见的一种亚恒星。

⑩ 更多详见维基百科词条：恒星光度列表 (https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_luminous_stars)。

星的光度差别巨大而质量差别较小，说明能维持恒星正常辐射的时间——即恒星的寿命差别很大：短的百万年，长的万亿年。通常来说，由于质量越大聚变速率越快，质量大的恒星寿命较短，质量小的恒星寿命较长，表 6.3 可供参考。

表 6.3 典型的恒星质量与寿命数据表。数据来源：Nuclei in the Cosmos

质量（太阳质量）	预期寿命（年）	典型光谱型
60	300 万	O3
30	1100 万	O7
10	3200 万	B4
3	3.7 亿	A5
1	100 亿	G2（太阳）
0.1	> 1 万亿	M7

核聚变与恒星的能源

地球接受来自太阳的能量才得以维持生机勃勃的生态环境，但太阳体内不可能储存无限多的能量，其长时期内以很大的功率辐射出去的那些能量是从哪里来的？在很早之前就有许多人做出过推断与猜测，例如：“烟煤说”认为太阳由烟煤组成，但这样太阳燃烧殆尽只需 5000 年；“引力收缩说”认为太阳靠自身的引力收缩产能，但要维持太阳的辐射，寿命也不会超过 1000 万年。而太阳自身已经有将近 50 亿岁了。那恒星的能源到底来自哪里？

1926 年，爱丁顿^①出版了其著作《恒星内部结构》（*The Internal Constitution of Stars*），提出：恒星的能源来自恒星内部的原子核聚变。而这个预测后来被证明是千真万确的。

这里我们默认读者已经了解原子核结构与核反应的相关基础知识，不熟悉的读者**强烈建议**先阅读本章补充阅读的相关部分。

所谓**核聚变**，就是两个质量较小的原子核结合成质量较大原子核的核反应。在恒星内部就是不断发生着这种反应。恒星内部的核聚变主要为**氢聚变**，有两类：**质子-质子链**（proton-proton chain）和**碳-氮-氧循环**（CNO cycle），见图 6.4。

为什么核聚变会放出大量的能量？这就不得不提到著名的**质能方程**，由爱因斯坦于 1905 年提出：

$$E = mc^2$$

④

^① 亚瑟·爱丁顿爵士（Arthur S. Eddington, 1882~1944），英国著名天体物理学家、数学家。他是第一个用英语宣讲相对论的科学家。

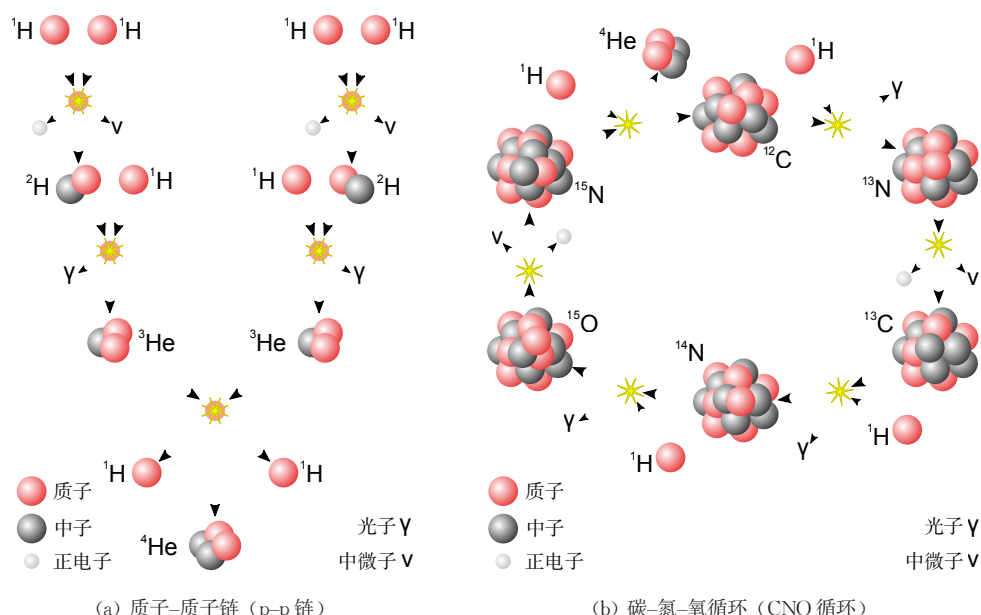


图 6.4 恒星内部的氢聚变，总的效果都是 $4\text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^4_2\text{He} + 2\text{}^0_1\text{e}^+ + 2\nu_e + 3\gamma$ ；其中 $\text{}^0_1\text{e}^+$ 为正电子， ν_e 为电子中微子， γ 为光子。图片来源：Wikipedia

其中 E 为物体的总能量， m 为物体的（动）质量， c 为真空中的光速。这恐怕是世界上最著名的物理学公式，它揭示了能量与质量可以相互转化。而我们知道光速 c 是一个很大的数，这表明：很小的质量就可以转化为巨大的能量。

原子核是核子凭借核力结合在一起构成的，要把它们分开，也需要能量，这就是原子核的**结合能**。由于结合能的存在，原子核的质量其实是小于组成它的核子的质量之和的，这个现象称为**质量亏损**。所以就算核反应过程中质量数（核子数）守恒，质量本身通常是不守恒的。但是，整个反应的能量依旧是守恒的。

现在不妨以具体例子为例看一看核聚变的放能。以一个氘（dǎo）核与一个氚（chuān）核聚合成一个氦核的同时放出一个中子为例：



其中 ^1_0n 代表中子， ΔE 代表放出的能量。已知实验上测得：中子的质量 $m_n \approx 1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，氘核的质量 $m_{^2_1\text{H}} \approx 3.3445 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，氚核的质量 $m_{^3_1\text{H}} \approx 5.0083 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，氦核的质量 $m_{^4_2\text{He}} \approx 6.6465 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。于是由式 ④ 质能方程和能量守恒定律，立刻得到：

$$\Delta E = (m_{^2_1\text{H}} + m_{^3_1\text{H}} - m_{^4_2\text{He}} - m_n)c^2 \approx 2.822 \times 10^{-12} \text{ J} \approx 17.6 \text{ MeV}$$

核聚变的反应条件十分苛刻。要使轻核发生核聚变，必须使它们的距离达到 10^{-15} m 以内，核力才能起作用，但这必须克服带正电原子核之间的巨大的库仑斥力。而恒星内部极高的温度，使得一部分原子核具有足够的动能，可以克服库仑斥力，碰撞时十分接近，发生核聚变；反应一旦发生，就不再需要外界给它能量，靠自身产生的热就会使反应继续下去。

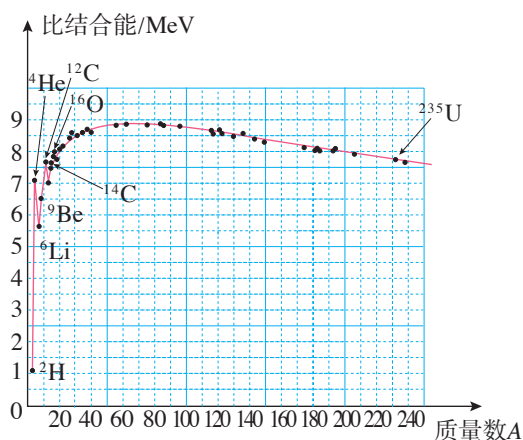


图 6.5 比结合能曲线。图片来源：人教版高中物理（2019 年新版）选修第三册

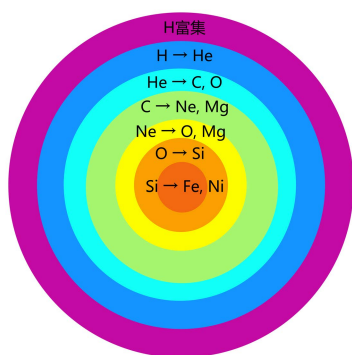


图 6.6 恒星核心区的“洋葱状结构”

这样的反应能一直发生下去，产生越来越重的原子核吗？答案是不能。

原子核的结合能与核子数之比，叫作**比结合能**（相对结合能）。不同原子核的比结合能是不一样的，比结合能越大，原子核中核子结合得越牢固，原子核越稳定。原子核的比结合能曲线如图 6.5。比结合能最大的原子核是 $^{56}_{26}\text{Fe}$ ，是最稳定的原子核。

当恒星内部形成 Fe 后，Fe 的聚变反应吸热而不是放热，恒星内部便不再继续核聚变生成比 Fe 更重的元素，从而形成洋葱状的结构，如图 6.6 所示。

关于更多细节内容（例如恒星内部能量转移和物理结构），目前仍是天文学科研中的重要研究方向。感兴趣的读者可以自行查阅更多专业文献。

2 恒星演化

主星序和主序星

前文已经提到过，绝大多数恒星位于赫罗图（见图 6.2）从左上到右下的主星序上，这些恒星就是**主序星**。宇宙中绝大多数恒星（包括我们的太阳）都是主序星，这是因为主序星阶段占据恒星一生中的绝大多数时间。不同质量的恒星在主序星阶段停留的时间不一样。

主序星是恒星最稳定的阶段，占据恒星一生的 90% 以上的时间。恒星形成主序星后，内部的核聚变平稳进行，恒星因核聚变放热对外产生的压力与引力达到平衡，每秒钟核聚变产生的能量与恒星释放的能量同样达到平衡。

在主序星阶段，恒星的主要能源为氢聚变，即将 4 个 ^1H 聚变成 1 个 ^4He ，这一过程除了有 2 个 e^+ 和 2 个 ν_e 的释放外，还伴随有 0.7% 左右的质量亏损，这些亏损的质量几乎全部转化为光能释放。以太阳为例，太阳每秒钟将 6 亿吨的氢转化为氦，质量亏损约为 420 万吨，通过爱因斯坦的质能方程（见式 ④）可以计算得到太阳每秒钟产生的能量约为 $3.8 \times 10^{26} \text{ J}$ ，与太阳辐射的光能几乎相等。

然而在主序星阶段，恒星的亮度也并非严格不变。由于核聚变主要发生在核心区域，核聚变生成的 ^4He 会使得核心区域密度增加，引力逐渐增强。这就会导致恒星核聚变的速率缓慢提高，亮度也会缓慢提升。以太阳为例，太阳刚刚进入主序星时亮度仅有现在的 70% ~ 80%，在随后的 40 多亿年中，太阳亮度逐渐提升最终达到今天的亮度。

恒星质量越大，聚变速率越快，光度也就越高。对于主序星来说，可以将光度 L 与质量 M 写成如下关系： $L \propto M^\alpha$ 。^⑫对于夜空中常见的恒星来说，它们的质量介于 1 ~ 10 倍太阳质量之间，经过计算可得在这一范围内 α 的平均值约为 3.88。但对于全部主序星来说， α 的平均值约为 3.2。这是因为质量较大的恒星内部核聚变主要为 CNO 循环，这一过程对温度更加敏感，但在温度足够高的情况下比 p-p 链更加迅速。而小质量恒星由于核心温度过低，CNO 循环占核聚变过程比例不高，内部更倾向于通过 p-p 链的形式发生核聚变导致产能率不如大质量恒星高。

从质光关系我们也可以看出，质量越大的恒星消耗燃料速度越快，寿命也就越短。恒星在主序星阶段停留的时间 τ 与消耗燃料的速度成反比，即 $\tau \propto M/M^\alpha = M^{1-\alpha}$ 。由于主序星阶段占据恒星的 90% 以上，所以可以认为，恒星的寿命与质量的 2 ~ 3 次方成反比。

恒星的形成——主序前星

现代的天文学观测表明，恒星诞生于星云之中。由于星云内部的物质受到各个方向的引力几乎平衡，所以在静止状态下是稳定的。但是当一片星云受到外界扰动的时候，这片星云内部就会出现密度的不均匀。随后，密度大的区域由于引力较大，会进一步坍缩，并将周围的气体吸引到这片区域附近，导致这片区域密度进一步增大。如此循环往复，这片气体云会先坍缩成分子云，然后形成一片原恒星（protostar），如图 6.7 所示。

在气体坍缩过程中，由于引力势能会不断转化为热能，气体的温度会不断升高，

^⑫ 见本章第 1 节质光关系。

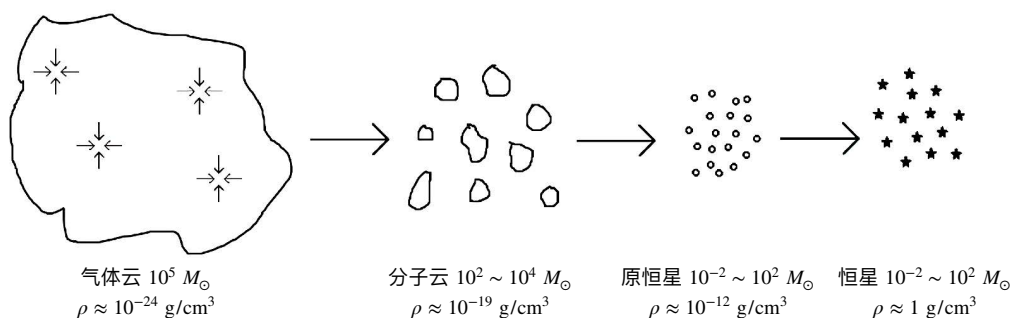


图 6.7 星际云坍缩，碎裂形成恒星的过程

这一过程会阻碍气体的进一步坍缩。要想让气体不断坍缩为原恒星乃至成为恒星，就需要气体有一定质量，这一质量称为**金斯质量**（Jeans mass），约为太阳质量的 10^5 倍。

原恒星形成后，恒星的质量基本稳定，此时的恒星也基本上呈现流体静力学平衡状态。但此时的恒星核心温度过低，无法引发氢聚变反应。在这一阶段由于恒星核心的温度不够高，恒星向外的压力不足以抵抗引力，此时恒星呈现准静态均匀坍缩，这一过程又称为**慢收缩阶段**。这一过程恒星的引力势能继续转化为热能，导致恒星核心的温度进一步升高。

当恒星核心温度达到 $8 \times 10^6 \text{ K}$ 的时候，核心区域的氢聚变宣告启动，恒星即成为一颗主序星。不同质量的恒星在原恒星阶段停留时间不同，质量越大的恒星，在原恒星阶段停留时间越短（ $\tau_{\text{KH}} \propto M^{\alpha}$ ^⑬， $\alpha \approx -1.3 \sim -2.6$ ）。一般来说，原恒星阶段的时间远远小于主序星阶段的时间，只有主序星阶段的 1% 左右。

如果恒星质量小于太阳质量的 0.08 倍，恒星会因为内部温度永远达不到氢聚变所需的温度而永远停留在原恒星阶段，无法进一步演化为主序星。这类恒星被称为**褐矮星**（brown dwarf），其表面温度只有不到 2000 K，发出的光线几乎全部为红外线，无法用肉眼直接看到。由于褐矮星内部无法发生氢聚变，褐矮星被认为是“失败的恒星”。

而如果原恒星质量过大，形成主序星后内部核聚变会过于猛烈从而导致内部的压力远远超过引力，这类恒星往往无法稳定存在。一般认为恒星质量的上限即为 150 倍太阳质量。

当温度达到 10^6 K 的时候，虽然此时温度尚未达到 p-p 链的引发温度，但氘核（即 ^2H ）可以自身发生核聚变。反应过程如下：



⑬ 下标 KH 意指该时标是**开尔文-亥姆霍兹时标**（Kelvin-Helmholtz time scale），有时也称热时标。

如果温度更高，Li、Be 和 B 等金属也会发生聚变并放出能量。然而由于这几种元素在宇宙中的丰度过低，这一聚变过程产生的能量几乎可以忽略不计。但这一过程可以显著改变恒星内部元素的比例。

中小质量恒星的后期演化

中小质量恒星后期会由于聚变产能率提高而造成亮度的提高，恒星体积会急剧增大但表面温度会降低，成为红巨星。其后期演化路径遵循以下过程：燃烧包层氢（膨胀为早期红巨星）——点燃氦聚变（小质量恒星为氦闪）——双层燃烧（恒星跨越造父脉动带）——氢聚变停止（膨胀为晚期红巨星）——生成简并态核心（恒星进入渐近巨星分支）——爆炸式巨变——抛出行星状星云（恒星成为白矮星）。

在恒星不断聚变的过程中，核心区域的氦元素比例逐渐提高。显然，当核心区域氢完全耗尽的时候，恒星核心的氢聚变即宣告停止。此时由于恒星的核心产能下降，恒星的核心区域开始收缩，并将外层的氢吸引至核心表面。由于核心温度比外层高得多，外层的氢刚刚触及核心即发生猛烈的核聚变。此时恒星的能源由核心外层的氢聚变包层提供，这一过程比主序星阶段的氢聚变更为激烈，产能速率更快。从宏观上看，恒星壳层氢聚变会使得恒星发生膨胀，表面温度降低，成为一颗早期的红巨星（red giant），如图 6.8 所示。在常见的恒星中，大角（牧夫座 α ）、毕宿五（金牛座 α ）就是典型的早期红巨星。随着壳层氢不断聚变为氦，恒星内部的氦核开始不断变大，中心温度也会不断升高。

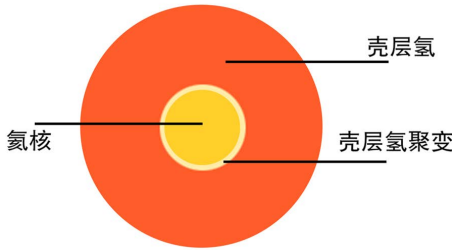


图 6.8 早期红巨星壳层氢聚变图

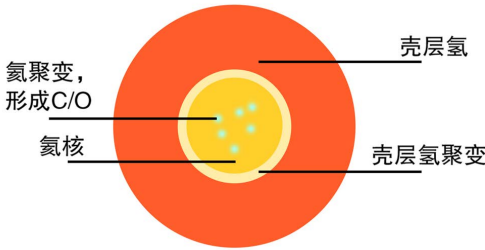


图 6.9 启动氦聚变

对于中等质量恒星（1.4 ~ 8 倍太阳质量）来说，通过氦元素的积累——坍缩过程足以使得核心的温度达到氦聚变所需的温度。当核心温度达到 10^8 K 的时候，恒星核心的氦聚变开始启动，这一过程会将 3 个 ^4He 转化为一个 ^{12}C ， ^{12}C 还可以继续与 ^4He 聚变成为 ^{16}O ，乃至 ^{20}Ne 。也就是说此时的恒星开始了双层聚变过程，即壳层的氢聚变和核心的氦聚变，如图 6.9 所示。但由于氦聚变产能率更低而且氦核的质量很小，所以此时恒星的主要能源依然为壳层氢聚变，氦聚变提供的能量仅起到一个锦上添花

添花的作用。而且希望读者注意，只有氦核心的最内部达到了氦聚变的条件，核心外层的氦是不聚变的，这也是氦富集区与氦聚变区的区别。

随着氦聚变的不断进行，恒星核心区域 C 和 O 元素的比例逐渐提高，并逐渐形成了 C-O 星核，此时氦聚变速率也不断加快。以 5 倍太阳质量的红巨星为例，刚刚启动氦聚变时，氦聚变供能仅占总能量的 6%，到氦丰度下降至 25% 左右时，氦聚变供能比例提高到了 20% 左右。而到了氦丰度降至 10% 以下时，氦聚变供能比例甚至可以提高至 48%，与壳层氢聚变平分秋色。此时的恒星呈现类似于“洋葱”的结构——核心为 C-O 星核，外面分别是 He 燃烧层和 H 燃烧层，如图 6.10 所示。这一过程中恒星会反复跨越赫罗图中的造父脉动带（instability strip，也称不稳定带），成为一颗造父变星。

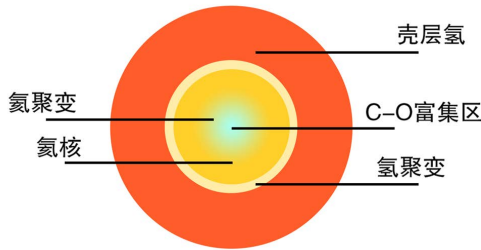


图 6.10 双层燃烧

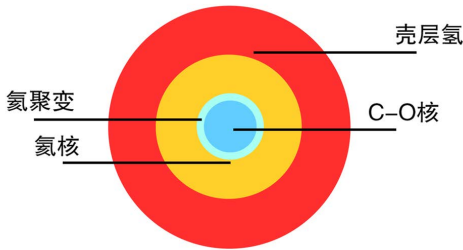


图 6.11 氦单层燃烧

随着壳层氢的不断消耗，氦聚变层不断外移至温度较低的区域从而停止。此时会出现一段恒星的能源只有氦聚变的时间。此时恒星会继续膨胀，成为一颗晚期红巨星，如图 6.11 所示。在常见的恒星中，鹤二（天鹤座 β ）即为典型的晚期红巨星。

随着内部 C、O 元素的不断积累，C-O 星核质量不断增大，引力不断增强从而导致 C-O 星核开始出现简并，也就是说在恒星内部出现了一颗“C-O 白矮星”。这个“白矮星”的出现使得恒星对流加剧，将外层的氢重新吸入内部从而点燃氢聚变，恒星重新进入双层聚变阶段，如图 6.12 所示。此时恒星光度会迅速提高，在赫罗图上沿着一条叫做渐近巨星支（asymptotic giant branch, AGB）的线移动。常见的恒星中，天囷一（鲸鱼座 α ）、蒭藁增二（鲸鱼座 σ ）即为典型的 AGB 分支内的恒星。

恒星进入 AGB 分支后便已进入暮年。和之前的双层聚变不同的是，此时的氦聚变非常不稳定，会呈现爆炸式的聚变。也就是说在某一瞬间会突然释放大量能量导致恒星的总光度急剧升高，然后渐渐黯淡下去，周期约为 3200 ~ 4300 年。这一过程还会使得恒星产生非常巨大的星风，每年会损失 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 倍太阳质量，损失的物质最终形成行星状星云（planetary nebula），中心的 C-O 星核因质量较低，导致压力与温度不够从而无法继续聚变下去，最终继续坍缩为一个 C-O 白矮星（white dwarf），

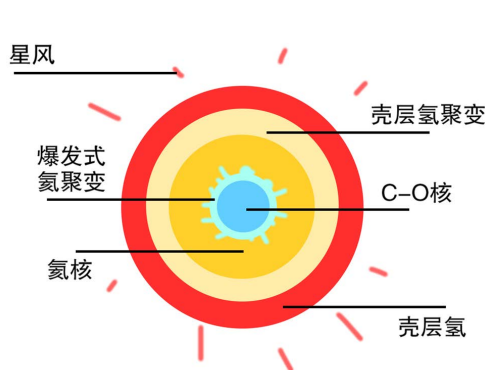


图 6.12 AGB 分支内的恒星

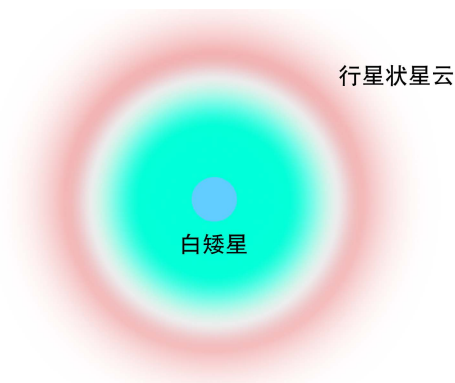


图 6.13 行星状星云与白矮星

如图 6.13 所示。

和中等质量恒星相比，小质量恒星后期演化轨迹略有不同。虽然小质量恒星也可以通过壳层氢聚变膨胀为早期红巨星，但由于小质量恒星的氦核密度更高，所以小质量恒星的氦核在发生氦聚变之前会先成为电子简并的核，即在中心坍缩为一个“He 白矮星”。

随着壳层氢聚变的不断进行，中心的氦核质量增大，当温度达到氦聚变所需温度的时候，电子简并态的氦核启动氦聚变。由于电子简并态的物质密度几乎不受温度的影响，这一过程会导致小质量恒星核心温度急剧升高，进而导致氦聚变以失控的速率进行。这一过程只持续数秒钟到数分钟，氦核的电子简并状态便会因温度过高而解除，此后氦聚变开始平稳进行。这一过程称为**氦闪**（helium flash），是一种失控的氦聚变。

质量小于 0.45 倍太阳质量的恒星，在红巨星阶段氦核无法达到启动氦聚变的温度，无法发生氦闪。理论上这类恒星在结束壳层氢燃烧后直接演化为行星状星云和 He 白矮星^⑭。而质量大于 0.45 倍太阳质量的小质量恒星最终的结局与中等质量恒星一样，成为行星状星云和 C-O 白矮星。

关于恒星内部核聚变的更多内容，可以参考本章后的补充阅读。

大质量恒星的后期演化

大质量恒星在主序星阶段光谱型往往会呈现 O 型或 B 型，表面温度高，颜色偏蓝。和中小质量恒星不同的是，大质量恒星的核聚变十分猛烈，在结束中心氢燃烧后尤甚。此时单纯通过辐射已经无法将这些能量全部传递出来，所以恒星开始膨胀后内部存在强烈的对流，而外部则具有强烈的星风。恒星质量越大，星风越强烈，物

^⑭ 由于小质量恒星的演化特征时间超过宇宙年龄，故此现在还未观测到氦白矮星。

质损失率也越高。这种星风使得恒星的光度急剧升高，人们将这类恒星称为**超巨星** (supergiant)，这类恒星是宇宙中最明亮的一类恒星。此外，大质量恒星的 C-O 星核可以达到继续发生聚变的温度，其聚变终点往往是比结合能最高的 ^{56}Fe ^⑮，最终剩余的质量往往会超过**钱德拉塞卡极限** (Chandrasekhar limit，详见本章第 3 节)，以超新星爆发的方式结束核聚变过程。

不同类型的大质量恒星在超巨星阶段的物质损失率不同，这也决定了它们在超巨星阶段的演化轨迹。下面分别列举不同质量的大质量恒星的演化轨迹：

a. < 20 倍太阳质量

20 倍以下太阳质量的主序星演化轨迹与中等质量恒星类似，在形成**红超巨星** (red supergiant) 后跨越造父脉动带回到红超巨星，最终形成白矮星或发生超新星爆发并形成**中子星** (neutron star)。演化历程如下：

主序星—红超巨星—（造父变星）—红超巨星—超新星

b. 20 ~ 40 倍太阳质量

这类恒星在主序星阶段表面温度更高，在膨胀为红超巨星之前会先经历一段**蓝超巨星** (blue supergiant) 时期。演化历程如下：

主序星—蓝超巨星—（黄超巨星）—红超巨星—（造父变星）—红超巨星—超新星

c. 40 ~ 60 倍太阳质量

这类恒星由于质量较大，聚变速率更快，星风更加猛烈。在红超巨星阶段会因为星风导致壳层被剥离一部分。此时由于恒星体积减小，表面部分与核心更接近从而演化为蓝超巨星。如果壳层全部被剥离，氢聚变层直接裸露，会成为表面温度更高，颜色更蓝的**沃尔夫-拉叶星** (WR star)。演化历程如下：

主序星—蓝超巨星—（黄超巨星）—红超巨星—蓝超巨星—（WR 星）—超新星

d. > 60 倍太阳质量

这类恒星的星风更加强烈，在氢壳层燃烧阶段甚至主序星阶段即可将外壳全部以星风的形式吹散。演化历程如下：

主序星—蓝超巨星—（高光度蓝变星）—WR 星—超新星

^⑮ 对于 8-10 倍太阳质量的中型恒星，由于其温度较低，故在形成简并的 O-Ne-Mg 核后就无法聚变下去，随后也会发生超新星爆发并形成中子星。

超新星

大质量恒星演化到末期，核心区域会在短时间内点燃碳聚变、氦聚变、氧聚变乃至硅聚变。随着聚变过程的不断深入，恒星通过核聚变所产生的能量越来越少，而越来越高的温度也使得恒星内部已经形成的核开始发生光解。当恒星聚变到铁元素的时候，一方面恒星已经无法通过继续聚变放出能量，另一方面内部的高温也使得已经聚变的元素发生光解。此时恒星对外辐射产生的压力已经不足以对抗引力了。于是已经无法产生能量的内核开始坍缩为致密天体。

对于大质量恒星来说，最终形成简并态核心的质量往往会超过钱德拉塞卡极限，即 1.44 倍太阳质量，这类恒星会继续坍缩为更加致密的中子星或其他天体。此时恒星的外壳以超过气体声速的速度撞击到表面。由于此时铁核已经高度简并，无法进一步压缩，因此这些物质最终会高速反弹从而使得整个恒星发生“爆炸”，这就是超新星爆发^⑩。

超新星 (supernova) 是宇宙中最为明亮的天体之一，当一颗恒星发生超新星爆发时，它的亮度往往会超过整个星系，成为整个星系内最为明亮的天体。根据超新星光谱的不同可以分为 I 型超新星和 II 型超新星，其中 I 型超新星不存在氢元素的吸收线，而 II 型超新星存在。此外，根据恒星是否有 Si 吸收线和 He 吸收线可以将 I 型超新星分为 Ia 型（有 Si 线）、Ib 型（无 Si 线，有 He 线）和 Ic 型（无 Si 线，无 He 线）。

目前认为 Ia 型超新星的形成机理有两种，一种是白矮星不断吸积红巨星表面的物质，当白矮星质量超过钱德拉塞卡极限后发生的超新星爆发；另一种是两颗白矮星相互环绕过程不断靠近导致碰撞合并。由于白矮星表面几乎不存在氢所以两种机制都有可能形成 Ia 型超新星。

Ib 型超新星和 Ic 型超新星的机理一般为 WR 星演化到晚期形成的超新星爆发，由于 WR 星已经将外壳氢全部抛出，所以这类超新星中不含有氢吸收线。

II 型超新星的机理一般为超巨星爆发，由于超巨星没有将壳层氢全部抛掉，所以这类超新星的光谱中存在氢线。

③ 恒星的结局

白矮星和黑矮星

小于 4 个太阳质量的恒星在演化末期无法提供燃烧核心中 C 和 O 所需的温度和压强，从而无法进行核聚变。此时它会喷射出外层物质而留下一个很热的富 C 富 O 核心。这个核心无法通过核聚变来产生能量，仅会发出热辐射并在宇宙空间中慢慢冷

^⑩ 除了文中所说的激波反弹理论外，还有基于高能中微子释放能量的延时爆理论。具体哪种效应构成超新星爆发的主要原因，学术界还在争论。

却。这个逐渐冷却的核心便是白矮星。黑矮星（black dwarf）指的是冷却到极低温度以至于无法发出可被探测的光和热的白矮星，由于这个冷却过程相当缓慢以至于理论上超出了我们通常认为的宇宙年龄，从而一般认为现在的宇宙中不存在黑矮星。下面我们主要介绍白矮星。

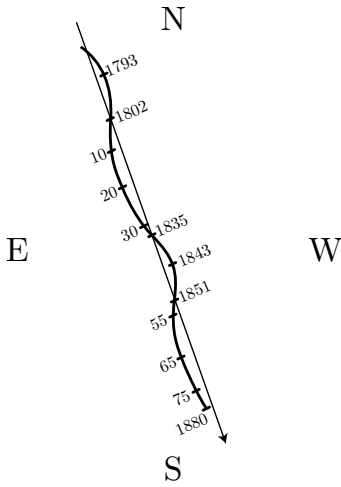


图 6.14 天狼星于 1793 年到 1880 年间的螺旋式自行。图片来源：Wikipedia

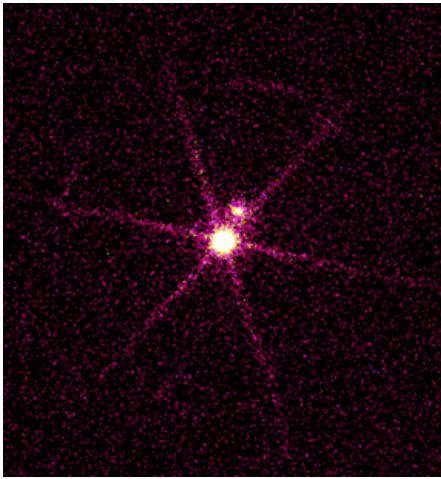


图 6.15 钱德拉 X 射线天文台拍摄的天狼星 A 与天狼星 B。图片来源：<https://chandra.harvard.edu/photo/2000/0065/index.html>

白矮星的发现与天狼星的自行有关。早在 1718 年哈雷就通过测量天狼星的位置发现了它的自行现象，1836 年贝塞尔进一步发现它的自行呈现波浪式的变化并由此推断它有一颗看不见的伴星，如图 6.14 所示。1862 年人们在天狼星附近发现了一个很小的光点，最后确认这就是它的伴星并命名为天狼星 B，而我们一般称的天狼星实际上叫做天狼星 A。天狼星 B 相当的暗淡，但其表面温度高达 8000 K，质量为 0.98 个太阳质量。利用黑体辐射和光度学的知识，我们可以算出天狼星 B 的直径只比地球大一点点，进而算出其密度超过 10^6 kg/m^3 。不过当时的人们并没有白矮星的模型，也就没有发展出解释这些性质的理论。

1924 年英国天文学家爱丁顿最早提出了白矮星的模型。他认为天狼星 B 内部的高温使原子都被电离成了电子和原子核这些体积小得多的粒子，从而天体的直径很小而密度非常高。由于表面积太小，这种天体往外辐射的总能量也就很少，进而看起来很暗。爱丁顿当时就称这样的天体为“white dwarf”。由于当时的物理学尚不能解释清楚白矮星的高密度态具体是如何形成并保持稳定的，这一观点并没有被当时的天文学家广泛接受。但是随着量子力学的发展，这一问题得到了解决。恒星衰亡时核聚变停止会使得对抗引力的辐射压大大降低，导致恒星在引力作用下坍缩，温度

升高，密度增大。此时原子核外的电子全部电离，只留下赤裸裸的原子核，其他电子都成为自由电子，这使得天体体积突然变小。根据泡利不相容原理（Pauli exclusion principle），系统内部不可能有两个电子占据相同的量子态，从而白矮星内部的电子会先占满低能态，然后依次占据更高的能态。因此，当电子密度很高时有很多电子处在高能态，这些电子的携带的动量便带来了压强。密度非常大时这种自由电子团叫**简并电子气**。根据量子力学，我们约束电子的区域越小，观测到的电子动量分布的方差越大。这意味着我们把电子约束在一个更小的区域时能够在统计上获得更大的**电子简并压**。可见，电子简并压与体积成反比且是一种与引力抗衡的力，白矮星便依靠它来与自身引力保持平衡。

白矮星质量增大会使得其自身引力增大，从而与引力平衡的电子简并压也应随之增大，于是其体积会缩小。不考虑相对论效应时其半径-质量关系近似满足 $R \propto M^{-5/3}$ ，但是这并不意味着其体积能够无限缩小。密度过高时大多数简并电子会处于高能级上，其速度接近光速而成为相对论性电子。此时在大约 1.44 个太阳质量处白矮星半径会趋近于零，这个质量极限也就是著名的**钱德拉塞卡极限**。质量超过这个上限时电子简并压无法与引力抗衡，天体会继续坍缩为中子星乃至黑洞。

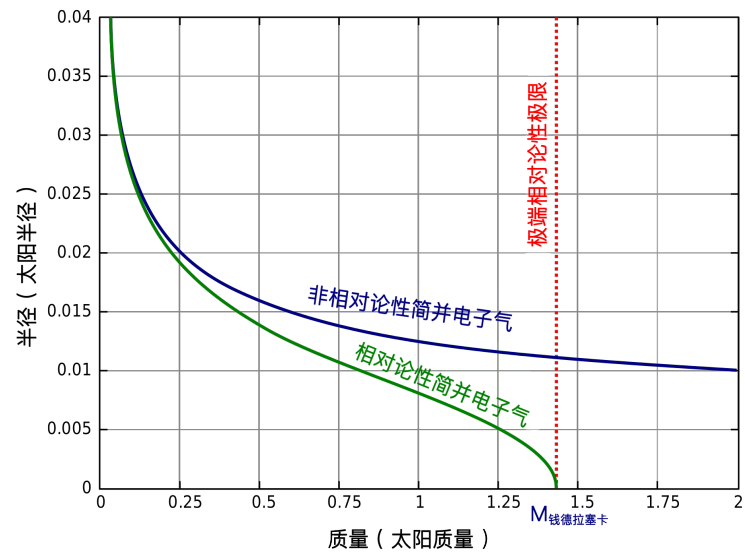


图 6.16 白矮星半径-质量关系。图片来源：Wikipedia

中子星与夸克星

首先，我们需要强调一般人们所称的“中子星”并非“‘中子’星”。上世纪 30 年代人们首次在理论上预言了中子星，而当时的物理学理论认为质子、中子这些粒子是最基本的粒子，从而把“中子星”叫做“‘中子’星”无可厚非。但是随着我们对物质结构认识的不断加深，人们开始怀疑中子星的主要成分可能并非中子，认为中子星主要由中子组成有过度简化之嫌。但由于“中子星”一词在人们的认识中已经先入为主了，从而在不是特别强调星体内部结构的具体模型时我们仍然沿用“中子星”一词来泛指超新星爆发后残留的脉冲星类致密天体。

一般的中子星质量大约在 1 到 2 个太阳质量之间，其密度的量级为 10^{17} kg/m^3 ，半径一般只有十几公里。理论上新生中子星的自转周期一般约为 10 毫秒，之后它会由于磁偶极辐射等因素损失自转能而使周期逐渐增长。同时，中子星有很强的磁场。人们一般认为这些极端性质是坍缩过程中角动量守恒和磁通量守恒的结果。

目前已知的大多数中子星在观测上都表现为脉冲星（pulsar），也就是持续发出脉冲信号的星体。人们在地球上用射电望远镜观测脉冲星时收到的是间隔规则的射电脉冲信号，这种周期性的脉冲信号便来自脉冲星的自转。一般上脉冲星的自转轴与磁轴并不一致，可是射电辐射是沿着磁极附近的磁力线发射的，这便使得它发出的射电辐射随着自转在宇宙中持续地扫过一片区域。如果地球恰好在这一区域中，人们就能接收到间隔规则的射电信号，这里的间隔也就是星体的自转周期。不过，并非所有的中子星都表现为射电脉冲星。当星体自转周期较大或磁场较弱时它就没法发出可被观测的射电辐射了，从而我们也把一般的中子星称为脉冲星类天体。

目前，中子星的内部结构仍是一个颇具争议的话题。尽管我们常用“中子星”这个词泛指这类天体，但是其内部成分并非简单的简并中子气。中子星内部的物理需要用刻画强相互作用的量子色动力学（quantum chromodynamics, QCD）来描述，可是人们现在对于低能强相互作用的认知存在很大的不足，从而我们无法根据 QCD 精确求解出中子星的整体结构，而这会带来在中子星内部夸克是否会解禁闭、奇异数是否起着关键作用等一系列问题。不过，众多学者还是推测出了多种中子星结构模型。

总的来讲，强子星模型中星体内部不存在游离夸克，而混合/混杂星模型认为中心密度足够高时会形成具有夸克物质的核心。夸克星模型认为中子星是几乎完全由夸克物质组成的致密星；认为奇子为基本组成单元的奇子星模型又有别于夸克星。在强子星和混合/混杂星模型中星体是依靠引力束缚的，这两类星体都有由原子核和电子等粒子组成的壳层；而夸克星和奇子星的表面是强相互作用自束缚的，原则上可以没有壳层。表面直接裸露的夸克（奇子）星也叫做裸夸克（奇子）星。对这些模型的进一步阐述如下：

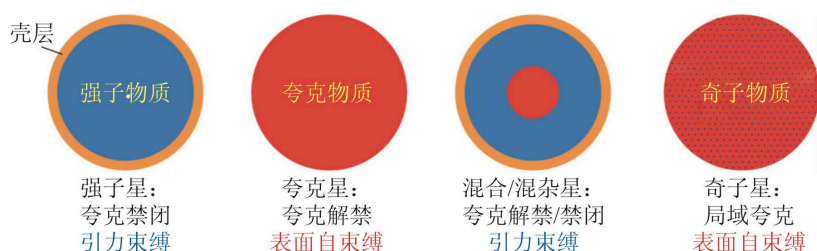


图 6.17 描述中子星内部结构的不同模型。图片来源: Xiaoyu L., Renxin X. Strangeon and Strangeon Star[C]. Journal of Physics: Conference Series. 2017, 861(1): 012027.

传统的“中子”星便是典型的强子星，其内部的主要成分就是中子。在强子星模型中，从表面到核心会因为密度的不断增大而具有不同的成分。粗略上我们可以把它分为壳层和核心。壳层大约厚 1000 米，又细分为外壳层和内壳层。外壳层密度从约 10^6 kg/m^3 开始随深度增加不断增大，主要成分是重原子核和相对论性简并电子气。随着密度的增大， β 平衡导致原子核逐渐富中子。中子在原子核中过度富集时会游离出来，而当密度进一步增加直至接近核物质密度时，原子核中几乎所有的质子都会变成中子。内壳层便由富中子的原子核、自由中子和电子组成，这里的中子会依靠强相互作用结合成库珀对，形成超流中子流体。

在内壳层下密度达到饱和核物质密度的中心区域叫做中子星的核心。这是中子星的主体，其质量超过中子星质量的 90%。这里已不存在原子核而主要存在超流中子流体、少量的电子和质子。一些理论预言在更接近中心的内核区域甚至可能出现 π 介子、K 介子或超子等粒子。

以上的讨论都以强子为基本自由度，可是在核心区域基本自由度可能不是强子。因为此时密度过高，直观上强子可能互相融合并出现解禁闭的夸克。而关于夸克如何存在，目前主要有两种观点。一种观点认为此时强子相与夸克相被一个密度不连续的间断面分开，这类星体被叫做混合星；另一种观点认为核心处的夸克和强子可能在宏观尺度上共存，密度连续变化，这类中子星被称为混杂星。不过不管是混合星还是混杂星，其壳层都和“中子”星的壳层一样，由富中子原子核和电子气构成。

根据目前强子结构的夸克模型，在中子星的密度范围内会出现上夸克、下夸克。同时，上下夸克间还可能会通过弱相互作用产生奇夸克。上世纪 80 年代，威滕 (Edward Witten) 提出了一个猜想：由数量近乎相等的上下奇夸克组成的夸克物质会比铁更稳定。这样猜想尚未被证明，但如果它成立，那么这种三味夸克物质就有可能出现在星体内部。由于这种夸克物质带有奇异数，从而夸克星也被叫做“奇异夸克星”或者“奇异星”。

最初的夸克星模型把星体比作一个巨大的核子，但是对于几倍核物质密度的物

质而言，夸克之间的相互作用是不可忽略的，而这涉及大量难以求解的低能 QCD 效应。目前一种改进夸克星模型的看法认为：致密星中物质组成单元可能并非夸克，而是类似强子的、带有奇异数的“夸克集团”，这个集团称为“奇子”（strangeon）。奇子星兼具中子星和夸克星的特点：与中子星相似的是奇子星的构成单元是类似强子的奇子而非游离的夸克；与夸克星相似的是奇子星也是在强相互作用下表面自束缚的星体，不必像引力束缚的中子星那样必须有壳层。

理论上中子星的质量也有一个上限。质量超过这个上限时，引力将会导致中子星进一步坍缩并形成黑洞。这个质量极限通常称为**奥本海默极限**（TOV limit，也称托尔曼-奥本海默-沃尔科夫极限）。由于我们现在对中子星结构的认识尚存在欠缺，现有的理论并不能对这个质量上限给出一个广为认同的确定的值。近几年对 GW170817 双中子星并合事件的观测研究给出的这个值大约为 2.17 个太阳质量。^{①⑦①⑧}

■ 黑洞简介

英国人米歇尔最早提出了黑洞的存在。他在牛顿力学框架下进行的讨论认为，如果某星体上粒子的逃逸速度是光速 c ，那么星体半径由下面的公式给出，而这个公式刚好等于后来人们根据广义相对论导出的**史瓦西半径**

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

如果星体足够致密，其半径也有可能小于史瓦西半径，此时光也无法摆脱星体的吸引，而这使得对远处的观察者而言星体看起来是黑的。当时这类星体被称为“暗星”。由于最开始对“暗星”的分析基于光的粒子说，从而人们在光的波动说占据主流后逐渐丧失了对它的兴趣。

后来到了 1915 年，爱因斯坦发展出了**广义相对论**，这套理论表明引力的确会影响光的径迹。不久后，史瓦西找到了爱因斯坦场方程的一个解，这个解能描述球对称情况下的引力场。几个月后，约翰内斯·德罗斯特（Johannes Droste）也独立地找到了这个解并更深入地研究了这个解的性质。史瓦西解在史瓦西半径处会出现奇性，这意味着在这个位置爱因斯坦场方程中的某些项会趋于无穷。在当时人们其实并没有很好地理解史瓦西解中奇性的意义^{①⑨}，不过爱丁顿的确在 1926 年出版的《恒星内部结构》一书中提到可能存在被压缩到史瓦西半径的天体，并且解释了我们为何无法直接观测到这类天体：“首先，引力场是如此之强以至于光线会像石头落回地球一样落回天体表面；其次，（就算有光线可以从这个天体上逃逸出来，）光谱的红移会如此剧

^{①⑦} Cho A. A Weight Limit Emerges for Neutron Stars[J]. 2018.

^{①⑧} Margalit B, Metzger B D. Constraining the Maximum Mass of Neutron Stars from Multi-messenger Observations of GW170817[J]. The Astrophysical Journal Letters. 2017, 850(2): L19.

^{①⑨} 事实上 1924 年爱丁顿证明经过某种坐标变换后史瓦西半径处的奇性消失了，这表明史瓦西半径只是史瓦西坐标的一个“坐标奇点”而非实际存在的“物理奇点”。广义相对论中的“物理奇点”在 $r=0$ 处。

烈以至于我们无法观测到它；第三，这种质量分布会带来如此大的时空曲率以至于空间会把这个天体包起来而把我们留在外面。”

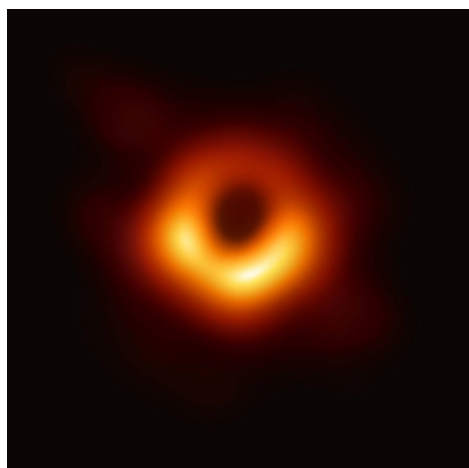


图 6.18 黑洞视界望远镜拍摄的 M87 星系中心超大质量黑洞的图像。^②图片来源: <https://www.eso.org/public/images/eso1907a/>

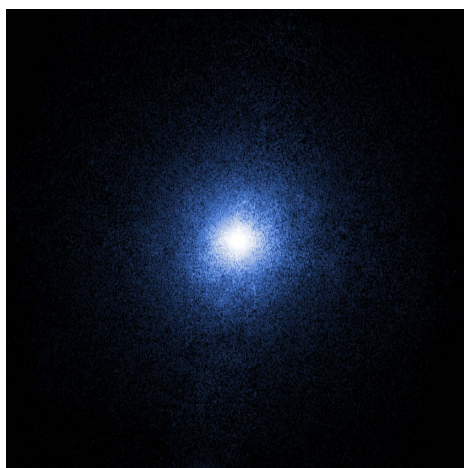


图 6.19 钱德拉 X 射线天文台拍摄的天鹅座 X-1。图片来源: https://www.nasa.gov/images/content/381549main_cygX1_final_665.jpg

1939 年奥本海默及其合作者提出了奥本海默极限，他们认为中子星质量超过这个上限时将没有什么物理定律能阻止它持续坍缩为黑洞。他们也对史瓦西解在史瓦西半径处的奇性进行了诠释：“时间在史瓦西半径处终结”^②，即对于外部观测者而言，这是他们所能观测到的极限——他们看到的这个天体的表面的情况永远停滞在了它坍缩到史瓦西半径的那一瞬间。

20 世纪 50~60 年代是广义相对论的黄金年代。1963 年，克尔找到了旋转黑洞的精确解；两年后，纽曼找到了带电旋转黑洞的解。后来沃纳·伊斯雷尔（Werner Israel）、布兰登·卡特（Brandon Carter）以及大卫·罗宾逊（David Robinson）的工作在数学上证明了**无毛定理**：稳态黑洞的解完全由克尔-纽曼度规的三个参数决定：质量、角动量以及电荷。

一开始有人认为黑洞解的奇异行为是我们求解方程时人为选取“不自然”对称条件的结果，在自然界中其实并不会出现奇性。然而在 20 世纪 60 年代末，彭罗斯和霍金证明了奇点是普遍存在的，也正是这个工作让彭罗斯获得了 2020 年诺贝尔物理学奖。后来到了 70 年代，天鹅座 X-1 成为了第一个被普遍接受为黑洞的天体。

70 年代早期詹姆斯·巴丁（James Bardeen）、雅各布·贝肯斯坦（Jacob Bekenstein），

^② 图中可见新月状的发射环和中心阴影，而这些都是黑洞视界的光子俘获区域经引力透镜放大后的像。环的亮度分布呈新月形是因为黑洞在旋转并发出相对论性射流，而中心阴影直径大约为视界直径的 2.6 倍。

^② 这句话是相对外部观察者而言的，真正的“时间终点”仍然在 $r = 0$ 处。

卡特和霍金还开创了对黑洞热力学的研究，他们通过把黑洞的质量、面积、表面引力分别与能量、熵、温度相对应而提出了一套与热力学定律非常相似的定律。这些工作最终由霍金在 1974 年完善，表明考虑量子场论效应时黑洞会像一个黑体进行辐射，而这个黑体辐射对应的温度和黑洞的表面引力成正比，黑洞的这种辐射也就是著名的霍金辐射。

关于黑洞的更多内容，感兴趣的读者可以参阅本章后面的补充阅读。

4 特殊恒星

双星

双星 (double star) 指当两颗恒星从地球上观察时，在视线的方向上非常接近（以至于肉眼看起来像是只有一颗恒星），但使用望远镜观测（或其他手段测定）时能分辨出来是一对的恒星。^{②②} 因此，双星可以是因多种原因形成的，主要分为两类：**联星** (binary star，也称物理双星) 和**光学双星** (optical double)。一般来说，在双星系统中，较亮的称为主星，较暗的称为伴星。^{②③}

利用高倍的望远镜将裸眼中单个恒星“分解”为双星，是一件很有成就感的事情，因此非常多的天文爱好者热衷于双星的观测。

■ 联星

联星是两颗恒星组成的（有物理联系的）恒星系统，它们围绕着共同的质心，在轨道上相互绕转。依据观察到是两颗星的方法不同，联星也可以分为若干类（当然，这些类之间可以有交集）：

(1) 目视联星 目视联星两颗子星之间分离的角度够大，可以用肉眼在望远镜中看出是两颗恒星，并进行观测。著名的例子有勾陈一^{②④}（小熊座 α ，即现在的北极星，见图 6.20）、常陈一^{②⑤}（猎犬座 α ）等等。

^{②②} 双星的定义众说纷纭，这里我们取了观测天文学上最主流、最准确的说法。有的教科书上直接将“双星”定义为文中所说的具有物理上引力联系的联星（例如：苏宜的《天文学新概论（第五版）》；朱慈盛《天文学教程（下册，第二版）》；甚至于《青天指南（第七版）》等等）。这可能是因为 double 和 binary 在中文里都有“双”的含义，导致了一些翻译问题；还可能是因为光学双星确实没有什么天文学上的研究价值，人们通常不感兴趣。而且实际上当我们提起“双星系统”时，通常指的都是联星系统。因此如果不想引起歧义，最好还是用英文吧。

^{②③} 双星系统的成员通常以尾码 A 和 B 来表示在系统内的名称，A 是主星，B 是伴星（例如前面图 6.15 中的天狼星 A 和天狼星 B）；尾码 AB 可能被用来表示整体这一对。在已经有拜耳名称且分离得够开的情况下，可能会对对这些成员使用上标来标记（例如南十字座 α （十字架二）的主星 α^1 和伴星 α^2 ）。

^{②④} 勾陈一实际上是一个三合星系统：主星（勾陈一 A）是一颗大的黄色造父变星（光变周期约 4 天），伴星（勾陈一 B）是一颗明亮的黄矮星，两者在 2400 AU 的距离上环绕着。在 1929 年，人们才发现勾陈一 A 本身又是一颗光谱联星，它有一颗非常靠近的矮伴星（勾陈一 Ab），二者相距 18.5 AU（大约是太阳至天王星的距离）。

^{②⑤} 值得指出的是，猎犬座 α 系统中，较亮的一颗是 α^2 （视星等 2.9 左右，是一颗几何变星），较暗的一颗才是 α^1 （视星等 5.6 左右），它们彼此相距约 675 AU。猎犬座 α^2 在变星类型上是猎犬座 α^2 型变星的原型。

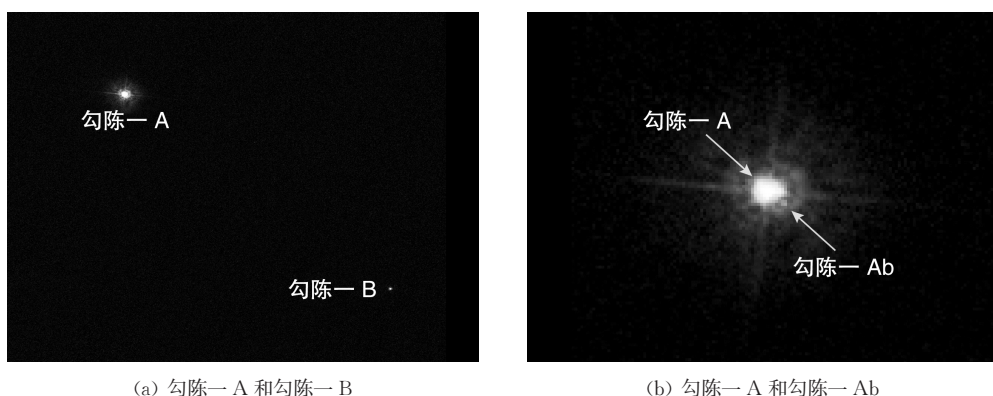


图 6.20 哈勃空间望远镜拍摄的勾陈一。图片来源：<https://hubblesite.org/contents/media/images/2006/02/1842-Image.html>

(2) **食双星** 是指互相绕行轨道几乎在与观察者视线平面的平行方向、会彼此掩食而造成亮度发生周期性变化的联星系统（因此它也是变星的一种）。最著名的例子莫过于大陵五（英仙座 β ）。分析食双星的光变曲线，可以获得两子星的半径、轨道面倾角及光度比例等比较可靠的数据。

(3) **光谱联星** 有时又叫分光联星，是在无法用肉眼及望远镜分辨的情况下，通过恒星的光谱测量发现是联星的系统。它又分为两类：只看到一颗星的光谱，谱线却具有周期性红移和蓝移^⑤的叫**单谱线联星**；明显看出是两颗星光谱叠加的叫**双谱线联星**。实际上，许多著名双星系统的子星后来都被确认为光谱联星，例如图 6.20(b) 中的勾陈一 A 和勾陈一 Ab。

(4) **天体测量联星** 这类联星很难用亮度或光谱方法测量（可能伴星几乎不发出电磁辐射或系统轨道面接近于与视线方向垂直），但通过主星的运动轨迹变化可以推测出其伴星的存在。例如图 6.14 中天狼星呈现的螺旋式自行，使得贝塞尔于 1840 年左右直接推断出伴星天狼星 B 的存在。观测表明，天狼星系统的两颗子星相距约 20 AU 相互绕转着。

■ 光学双星

光学双星是两颗毫无关联的恒星，它们可以相距很远，只是从地球看过去恰好对齐在一起。例如摩羯座的牛宿二（摩羯座 α^2 ）和牛宿增六（摩羯座 α^1 ），它们本身相距约 600 光年。

^⑤ 波源和观察者有相对运动时，观察者接受到波的频率与波源发出的频率并不相同，这在物理学上被称为**多普勒效应**（Doppler effect）。对于光波，如果光源远离我们而去，则光的谱线就向红光方向移动，称为**红移**；如果光源朝向我们运动，光的谱线就向紫光方向移动，称为**蓝移**。

■ 未确认的双星

实际上，有许多双星系统还没有彻底确认是否具有物理上的联系，具有一些争议。很多我们耳熟能详的双星都包含在内，例如：

- 大名鼎鼎的“开阳双星”：开阳（大熊座 ζ ，北斗七星中勺柄往勺口数第二颗）和辅（大熊座 80）^{②7}；
- 学会例行观测时的常客，被称为“会星”的辇（niǎn）道增七（天鹅座 β ），其中主星辇道增七 A^{②8}呈明亮的黄色，伴星辇道增七 B 呈微弱的蓝色。

国外著名的天文论坛 Cloudy Nights 上有一个关于各式各样的双星列表的帖子，非常值得有兴趣的读者参考：<http://www.cloudynights.com/topic/11874-links-double-star-lists-sketches-in-this-forum/>。

利用望远镜观测双星时，要先在低倍下找到目标，再尽可能放大到高倍。一般来说，口径越大的望远镜分辨能力越强，可以分辨出距离更近的双星。亮度接近、颜色对比明显的双星是望远镜视野中一道独具特色的美妙风景线。

■ 变星

顾名思义，**变星**（variable star）是从地球上观察时其亮度（视星等）有起伏变化的恒星。变星的光变形式多姿多彩，按照变星的亮度/光谱变化的原因可以把它们分为**物理变星**（intrinsic variables，也称内因变星）和**几何变星**（extrinsic variables，也称外因变星）。

■ 物理变星

物理变星是由真正的物理因素引起亮度真实发生变化的恒星，主要包含脉动变星、喷发变星、激变变星、爆发变星等。对于各类变星及其下属细类（由于太多）我们不做过多展开，下面只提及一些重要的变星及其性质。

（1）长周期变星 脉动变星的一种，亮度像人的脉搏一样有节奏地变化，但光变周期在数周到数年之间。亮度周期性变化的原因是星体在有节奏地膨胀和收缩，这是主序星演化到晚期脱离主星序后出现的一种结构不稳定的现象。典型的例子为**蒭藁**（chúgǎo）增二（鲸鱼座 α ）^{②9}，英文名为 Mira，因此和它类似的长周期变星被归类为

^{②7} 但是开阳本身是一个四合星系统，主星开阳 A 和伴星开阳 B 相距约 380 AU 相互绕转，而其中开阳 A 和开阳 B 又各是光谱联星。2009 年，辅被发现也是一个联星系统。因此，我们平常所说的“开阳双星”实际上是一个六合星系统。

^{②8} 1976 年，人们发现辇道增七 A 本身又是一个联星系统，因此辇道增七是一个三合星系统。

^{②9} 蒭藁增二也是一个联星系统：主星蒭藁增二 A 是红巨星（造成亮度变化的变星），伴星蒭藁增二 B 是白矮星，二者相距约 100 AU 相互绕转。

米拉变星。

(2) **造父变星** 可能是最著名的一类变星，也是脉动变星的一种。这类变星的名称来源于造父一（仙王座 δ ）^⑩，最亮时 3.6 等，最暗时 4.3 等，光变周期约 5 天 8 小时 47 分，十分精准，见图 6.21。

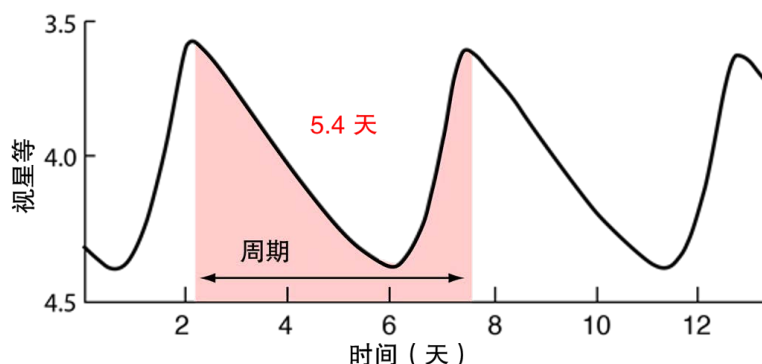


图 6.21 造父一的周期性光变曲线。图片来源：<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/cepheid.html>

这类变星之所以重要，是因为它们的光变周期和光度之间存在着明确、直接的关联，称为**周光关系**（period-luminosity relation）。对于经典造父变星，有

$$M = (-2.43 \pm 0.12)(\lg P - 1) - (4.05 \pm 0.02) \quad (5)$$

其中 M 是绝对星等， P 是光变周期（以天为单位）。^⑪ 可以看出，造父变星的光变周期越长，光度就越大。

周光关系提供了一种简单却重要的测定造父变星距离的方法：测定光变周期，即得知绝对星等，再根据视星等就可以算出距离。如果星团或河外星系中有造父变星，那么星团或星系的距离也就可以得知了。因此，造父变星是天文学中最重要的**标准烛光**（standard candles）之一，可以测量数千万秒差距的距离。

除了造父一本身之外，著名的经典造父变星还有勾陈一、天桴（ μ ）四（天鹰座 η ）、井宿七（双子座 ζ ）等等。

(3) **超新星** 激变变星的一种，是某些恒星在演化接近末期时经历的一种剧烈爆

^⑩ 造父一也是一个联星系统：主星造父一 A 是黄超巨星（造成亮度变化的变星），伴星造父一 B 是一颗光谱伴星，它们的绕转周期约 6 年；但造父一本身还有一个相距较远的目视伴星 HD 213307（HIP 110988，有些文献称之为造父一 C），该目视伴星自身又是一颗光谱联星。目前一些观测表明造父一系统和 HD 213307 系统可能有物理上的联系，使之成为一个四合星系统，详见 2015 年的一篇文章：Anderson R I, et al. Revealing δ Cephei's Secret Companion and Intriguing Past[J]. The Astrophysical Journal, 2015, 804(2): 144。实际上，许多经典造父变星都被发现是双星系统，见 <https://konkoly.hu/CEP/nagytab3.html>。

^⑪ 式 (5) 来源于 2007 年的一篇文章：Benedict G F, et al. Hubble Space Telescope Fine Guidance Sensor Parallaxes of Galactic Cepheid Variable Stars: Period-Luminosity Relations[J]. The Astronomical Journal, 2007, 133(4): 1810，是建立在哈勃空间望远镜对邻近的 10 颗造父变星以三角视差测距上的结果。

炸（详见本章第2节），极其明亮且持续时间很长。

其中重要的一类是 **Ia 型超新星**：由于发生爆炸的物理机制相似，它们在到达最大亮度时的绝对星等（-20 等左右）差别不大，且与光变曲线之间有很明确的函数关系^②。因此 Ia 型超新星也是天文学中重要的一种**标准烛光**，可以用来测量数亿秒差距外宿主星系的距离，目前可以做到误差在 5% 左右。

正是由于这种特性，Ia 型超新星在物理宇宙学中也具有重要的价值。1990 年左右，天文学家开始通过 Ia 型超新星验证**哈勃定律**^③。然而，1998 年观测 Ia 型超新星的结果表明，宇宙似乎正在加速膨胀。^④

■ 几何变星

几何变星的亮度变化是由于可以到达地球的光量有所变化（而非它们自身的亮度发生了变化）。

（1）**食双星** 在**双星**部分已经讲过，在此不再赘述。

（2）**自转变星** 可能是多种原因导致的。例如：拥有较大亮区或星斑的恒星在自转时，当亮区或星斑出现在视野中就有可能出现显著的亮度变化；也有可能是恒星高速自转导致磁场变化，从而导致亮度变化；还有可能是恒星具有椭球体形状，当朝向观测者的面积因形状不同而改变时，亮度也会发生变化。

很多天文爱好者热衷于观测变星。通过记录变星亮度（视星等）并进行统计，可以研究变星的性质——这也是普通的天文爱好者参与天文学科研的一种途径。

变星观测爱好者们常用的网站是美国变星观测者协会（AAVSO）官网：<https://www.aavso.org>，观测者可以在上面查阅相关资料，并提交自己的变星观测报告，为天文学家提供变星的科学研究资料。对于使用中文的目视观测者，美国变星观测者协会也提供了中文版的《目视变星观测手册》（*Manual for Visual Observing of Variable Stars*），有兴趣从事变星观测的爱好者可以访问链接：<https://www.aavso.org/visual-observing-manual-chinese>。

^② 感兴趣的读者可以查阅**飞利浦关系**（Phillips relationship）。

^③ 指遥远星系的退行速度与它们和地球的距离成正比，详见第七章《深空天体》第6节第6小节。根据2018年10月国际天文联合会（IAU）的决议，这条定律的标准名称现在已经改为**哈勃-勒梅特定律**，以纪念更早发现宇宙膨胀的比利时天文学家乔治·勒梅特（Georges Lemaître）。

^④ 详见 Riess A G, et al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant[J]. The Astronomical Journal, 1998, 116(3): 1009. 该成果于1998年被权威学术期刊《科学》评为年度科研突破（Breakthrough of the Year），见 <https://science.sciencemag.org/content/282/5397/2156.1>。

补充阅读

发光强度、照度及其单位

发光强度和照度这两个物理量并不好理解。回想一下你过去接触过的各种单位，你会发现 7 个基本国际单位（见表 6.4）中只有最后一个**发光强度**的单位“坎德拉”我们基本没有接触过。

表 6.4 7 个基本国际单位

名称	米	千克	秒	安培	开尔文	摩尔	坎德拉
符号	m	kg	s	A	K	mol	cd
物理量	长度	质量	时间	电流	热力学温度	物质的量	发光强度

在介绍照度和发光强度以前，我们要先引入**立体角**的概念^⑤，这对我们后面的讨论是很有必要的。

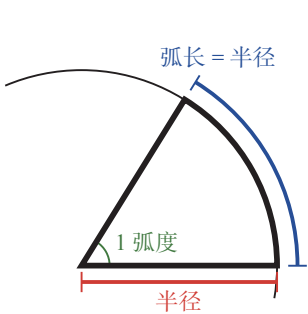


图 6.22 单位弧度

我们都学过如何度量平面上的角度。在平直的 2 维空间（也就是平面）上，**平面角**的大小定义为以两射线交点为圆心的圆被射线所截的弧长与半径之比。由定义出发，最常用的单位是**弧度**（radian, rad）：单位弧度定义为圆弧长度等于半径时的圆心角（如图 6.22），所以一个完整的圆的弧度为 2π （因为圆周长公式 $C = 2\pi r$ ）。以上内容都是众所周知的，但如果是我们所在的三维空间中，空间的“角度”应该如何去度量？最朴素的想法就是做类比。

如图 6.23，对于 2 维的几何对象 f （这里是弧线段 AB ），考虑其对于参考点 O 的平面张角，可以由上述定义绘制一原点在 O 的**单位圆**，那么张角 θ 就等于其径向投影于单位圆上所对应的弧长 l 。

类似地，如图 6.24，考虑 3 维的几何对象（如曲面 Σ ）。于是和 2 维中的情形类比，作一球心在参考点 O 处的**单位球**，那么 Σ 对 O 的张角 Ω 就可以定义为其径向投影于单位球上所对应的面积 A 。这就是**立体角**（solid angle）。和弧度类似，立体角最常用的单位是**球面度**（steradian, sr）：单位球面度就定义为球面上的一块面积等于球体半径平方时对球心所张的立体角。于是显然，任意闭合曲面对其内部一点所张立体角的大小均为 4π ，因为球表面积公式为 $S = 4\pi r^2$ 。

^⑤ 如果你是物理学院的同学，相信你对此并不会感到很陌生。

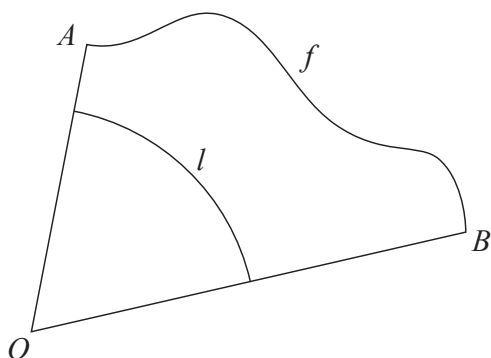


图 6.23 平面角

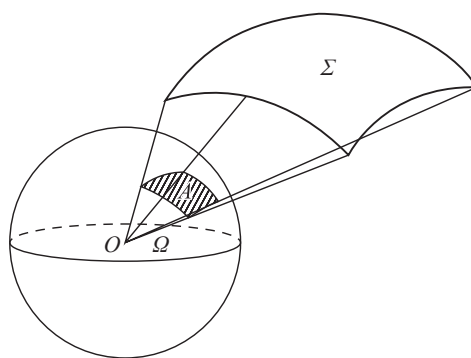


图 6.24 立体角

下面我们回到正题。不同于通常我们所说的**辐射强度**（radiation intensity，含有能量量纲），发光强度的定义考虑人的视觉因素和光学特点，是在人的视觉基础上建立起来的，所以不能通过其他单位导出。图 6.25 表示的是**相对视见函数** $V(\lambda)$ ，它表征人眼对不同波长光的平均视觉灵敏度。

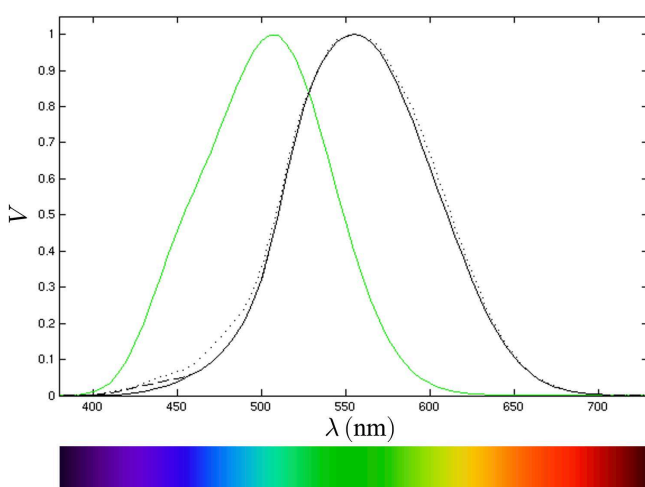


图 6.25 相对视见函数。图片来源：Wikipedia。

我们先说明**光通量**（luminous flux） Φ 的概念：它体现的是**人眼感受到的光功率**，用来表示辐射功率经过人眼的相对视见函数影响后的光谱辐射功率大小，单位为**流明**（lumen, lm）。可以认为，光通量就是将辐射能量通量以相对视见函数为权重因子折合成的对眼睛的**有效数量**。可见虽然光度学中的光通量和辐射度学中的辐射功率关系紧密，但因为经过了加权，失去了物理上对真实功率的反映，所以是一个独立的物理量。

现在定义**发光强度** I ：一个点光源的发光强度 I 为该光源沿某一个方向在单位立体角内发出的光通量：

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

根据 1979 年第 16 届国际计量大会的决议^⑤，坎德拉的定义为

给定一个频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射光源（通常呈黄绿色），该辐射源在给定方向上的辐射强度为 $\frac{1}{683}$ 瓦特每球面度（W/sr），此时该辐射源在该方向的发光强度为 1 坎德拉（cd）。

可见，定义坎德拉时必须同时指出波段（即发光频率）及其对应的辐射功率强度，因为人眼对于不同波长光的灵敏度是不同的。

理解了发光强度与光通量的概念，照度就很好理解了。**照度**（illuminance）是每单位面积所接收到的光通量，单位是勒克斯（lux, lx）。根据定义，显然有 1 勒克斯 = 1 流明每平方米（ $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$ ）。

介绍完这些，不妨尝试应用一下上面的知识。

例 发光强度为 1 坎德拉的均匀光源，位于半径为 1 米的球的球心处，并均匀照亮整个球面。求球面上的照度（用勒克斯表示）。如果球半径变为 2 米呢？

解 回想发光强度的定义：光源沿某一个方向在单位立体角内发出的光通量。由于整个球面对球心张的总立体角为 4π ，发光强度为 1 坎德拉且球面被均匀照亮，因此总光通量为 4π 流明。再回想照度的定义：每单位面积所接收到的光通量。由于球半径为 1 米，总的表面积为 4π 平方米，而我们已经得到总光通量为 4π 流明，因此球面上各点的照度均为 $4\pi \text{ 流明} / 4\pi \text{ 平方米} = 1 \text{ 勒克斯}$ 。若球半径为 2 米，那么总表面积为 $4\pi \times 2^2$ 平方米，照度变为 0.25 勒克斯。可见，当光源不变时，照度随距离增大是平方反比衰减的。

亮度、视星等与绝对星等之间关系的数学推导

现在我们来量化星等与亮度之间的关系。我们只需要用到最基本的高中数学的对数知识，希望读者不要看见数学公式就一味地逃避。

用 E 表示亮度， m 表示星等。假设有两颗恒星，其亮度分别为 E 、 E_0 ，星等分别

^⑤ 实际上，在第 26 届国际计量大会上对基本国际单位进行了重新定义，决议于 2018 年 11 月 16 日通过，2019 年 5 月 20 日（世界计量日）起正式生效。修改后坎德拉的定义为：坎德拉，符号 cd，SI 的给定方向上发光强度的单位。当频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射的发光效率以单位 lm/W 表示时，将其固定数值取为 683 来定义坎德拉。可见坎德拉的新定义实质上与过去已有的相同，但表达更为严格。考虑到原定义更容易理解，故放在正文中。

为 m 、 m_0 ，考虑到星等之间为等差数列、亮度之间为等比数列，它们应该满足关系：

$$\frac{E_0}{E} = q^{m-m_0} \quad (6)$$

其中 q 为等比数列的公比。又因为 1 等星要比 6 等星亮恰好 100 倍，代入有

$$100 = q^{6-1} \Rightarrow q = \sqrt[5]{100} = 10^{2/5} \approx 2.512$$

$q \approx 2.512$ 通常也被称为**普森系数** (Pogson's ratio)，它表明星等减少 1 级，亮度就是原先的约 2.512 倍。

对式 (6) 两边取对数，经过简单的整理，最终可以得到：

$$m - m_0 = -2.5 \left(\lg \frac{E}{E_0} \right) \quad (7)$$

需要注意的是，这里出现的 2.5 与普森系数的 2.512 并不一样。如果取 0 等星的亮度 $E_0 = 1$ （一个相对没有量纲的单位），那么式 (7) 就可以简单写为

$$m = -2.5 \lg E \quad (8)$$

式 (7) 和式 (8) 就是著名的**普森公式**。

现在再来推导视星等与绝对星等的换算公式。由于光源的照度与到其距离的平方成反比^⑦，因此设恒星到地球的距离为 d ，标准距离为 D ，视星等为 m ，绝对星等为 M ，视亮度为 e ，真亮度为 E ，于是结合式 (7) 有

$$\begin{cases} \frac{E}{e} = \frac{d^2}{D^2} = \frac{d^2}{100} \\ m - M = -2.5 \left(\lg \frac{e}{E} \right) \end{cases}$$

整理得视星等与绝对星等的换算公式（距离 d 以秒差距为单位）：

$$m - M = 5 \lg d - 5 \quad (9)$$

视星等和绝对星等之差 $m - M$ 就是**距离模数**，因此式 (9) 也叫距离模数公式。

恒星大气与光谱形成

首先我们要进一步了解光谱。光谱可以分为三种类型：**连续光谱**、**发射光谱**和**吸收光谱**。^⑧

1. 连续光谱 炽热的固体、液体或高温高压下的气体都会发射各种波长的光波，因而形成不间断的连续光谱。例如普通的钨丝灯，就是一个典型的连续光谱光源。

2. 发射光谱 在低压条件下，稀薄、炽热的气体或蒸汽不能产生连续的全部谱线，只能产生单色的、分离的明线状光谱，即发射光谱。例如钠蒸汽，在炽热状态就

^⑦ 详见本章补充阅读。

^⑧ 1858 年，德国物理学家基尔霍夫 (Gustav R. Kirchhoff) 发现了产生这三种光谱的原因。基尔霍夫在很多领域都有贡献，最著名的莫过于电路分析的基础：基尔霍夫电路定律。

能产生波长为 589.0 nm 和 589.6 nm 的一对黄线。每种化学元素都有它独特的、在光谱区有固定波长位置的一组发射光谱。

3. 吸收光谱 由产生连续光谱的光源发射的光，穿过低压、低温环境下的稀薄气体或蒸汽，从连续光谱的全部谱线中，有选择地吸收了它自己在低压、高温状态下所发射的发射谱线，形成吸收光谱。吸收光谱是与发射光谱相对的。钠的发射光谱与吸收光谱示意图如图 6.26。

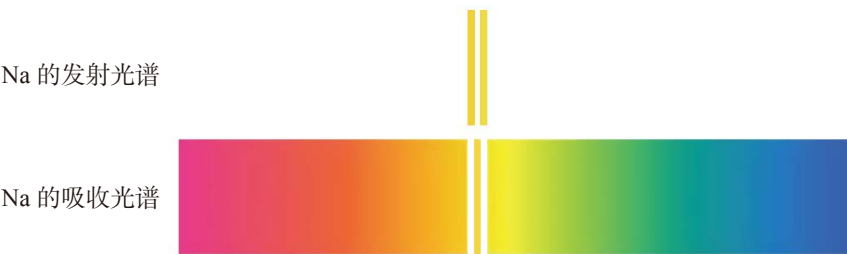


图 6.26 钠的发射光谱与吸收光谱示意图

我们知道，恒星辐射的能量来源于核心内的核反应^③。核反应产生的能量通过组成恒星的气体逐步向外运输，在运输的过程中辐射的能谱会发生变化。所以观测到的从星面逸出的辐射的光谱完全是由表面很薄的一层（厚度不到恒星半径的 0.1%）的气体的温度、密度和化学成分决定的，并不能反映核心内辐射场的能谱。

恒星是气体球，其表面不如具有固态表面的物体那样截然分明。由于原子、分子、自由电子对辐射的吸收和散射，气体不是完全透明的，其不透明度依赖于气体的化学成分、温度和密度。从恒星中心向外，温度、密度逐渐减小；因此一般来说，气体的不透明度也向外减小。于是，在恒星的外部存在一个对辐射透明的区域，从这里发出的辐射可以从星面逸出到达观测者。由于这个区域的厚度远小于恒星半径，因此恒星仍具有清晰的表面。太阳是唯一能看到圆面的恒星，日轮的轮廓其实是相当清晰的。

太阳的大气由光球层、色球层（过渡区）和日冕层组成，而很多观测事实表明，其他恒星的外层也存在类似的结构。例如，观测恒星紫外光谱的 IUE 卫星^④发现很多类型的恒星有类似太阳的色球层与过渡区的光谱；一些 X 射线卫星发现了数以万计的恒星存在类似于日冕的星冕，许多星冕发射的 X 射线能量比日冕大几个数量级。

恒星的光球层以及光球层以上的区域统称为**恒星大气**。光球层之下的区域统称为**恒星内部**，在那里气体的不透明度很大，以至于无法观测到。然而应当指出，恒星大气和恒星内部之间并没有明确的分界线。

^③ 详见本章第 1 节。

^④ 国际紫外线探测卫星（International Ultraviolet Explorer），1978 年 1 月 26 日以 NASA 的三角洲系列运载火箭发射，1996 年 9 月 30 日仪器关机。

典型的恒星光谱是在连续光谱的背景上重叠着吸收线。最初，天文学家粗略地把恒星大气分为两层来解释恒星光谱：底层热而密，产生连续光谱；上层冷而稀，其中的原子、分子在特定波长上吸收底层辐射，产生吸收线。这是一个十分简化的模型。实际上，恒星大气中的每一团气体都在同时发射和吸收光子，过程十分复杂，但是总的效果是确实是恒星大气中各种原子、分子对应特征波长上的辐射被削弱，以至于从星面逸出的辐射光谱中出现了吸收线。也正是因为这个原因，天文学家可以将恒星光谱与已知元素的光谱相对照，确定恒星的化学成分，甚至可以根据谱线强度确定各元素的含量。太阳的辐照度光谱如图 6.27 所示。

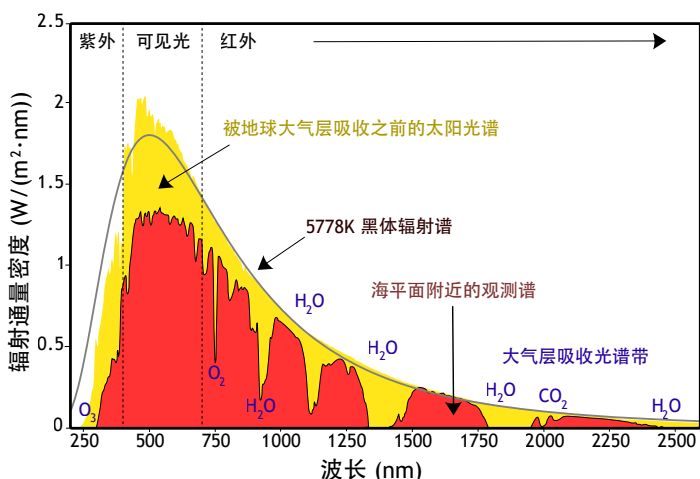


图 6.27 在大气层之上和海平面处的太阳辐照度光谱。图片来源：Wikipedia。

另外，恒星光谱的形态与恒星大气中的温度密切相关，但是恒星大气中不同高度上的温度是不等的，因此我们需要定义一个有意义的温度。恒星的有效温度取为单位面积的辐射功率与恒星表面单位面积的辐射功率相等的黑体所具有的温度。^④一个黑体表面的单位面积在单位时间内辐射出的总能量由斯特藩-玻尔兹曼定律给出：

$$P = \sigma T^4 \quad (10)$$

其中， T 是热力学温度， σ 是斯特藩-玻尔兹曼常数， $\sigma \approx 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

正常恒星的有效温度都在几千至几万开的范围内，此时许多原子都会被电离，因此恒星大气中一般同时包括中性原子、离子和自由电子。它们对于恒星光谱的形态有很大的影响。

^④ 一般物体受到辐射时，对辐射的能量总是有吸收、有反射。黑颜色的物体吸收能力大于白颜色的物体，这就是夏天穿白衣服要比黑衣服凉快的缘故。如果一物体能将全部能量吸收而没有反射，那么该物体就称为绝对黑体，简称黑体 (black body)。一般物体在某一温度下都会发出辐射，吸收能力大的物体，总辐射能力也强，因此黑体的总辐射能力最强。实际上，真正严格的绝对黑体是不存在的，但在物理学中总是把绝对黑体当作理想的模式进行理论推导，再将所得结果推广到一般情形。

原子核结构与核反应基础

我们都知道，原子是由**原子核**（nucleus）和**电子**（electron）组成的。而原子核又是由**质子**（proton）和**中子**（neutron）组成的，质子带一个单位正电荷（ $+e$ ），中子不带电，见图 6.28 (a)。质子和中子除了是否带电的差异以及质量上的微小差别外，其余性质十分相似，而且都是原子核的组成成分，所以统称为**核子**（nucleon）。

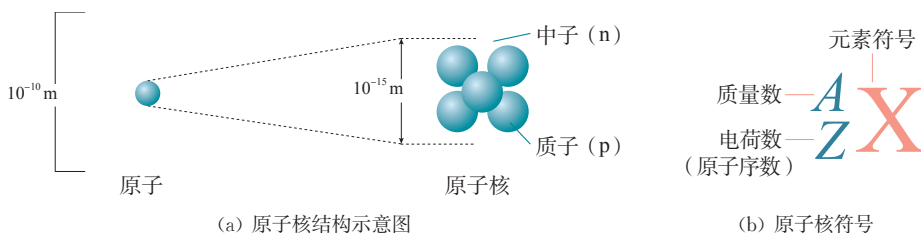


图 6.28 原子核。图片来源：人教版高中物理（2019 年新版）选修第三册。

由于中子不带电，原子核所带的电荷等于核内质子电荷的总和。所以，原子核所带的电荷总是质子电荷的整数倍，通常用这个整数表示原子核的电荷量，叫作原子核的**电荷数**，用 Z 表示，数量上等于这种元素的**原子序数**。原子核的质量等于核内质子和中子的质量的总和，而质子与中子的质量几乎相等，所以原子核的质量几乎等于单个核子质量的整数倍，这个倍数叫作原子核的**质量数**，用 A 表示，数量上等于原子核内的核子数。

于是，对于任何一种原子核我们都可以用符号 ${}_Z^AX$ 来表示，其中 X 为元素符号， A 表示核的质量数， Z 表示核的电荷数（即原子序数），见图 6.28(b)。例如，氢原子核（即质子）可以表示为 ${}_1^1\text{H}$ ，氦原子核（有 2 个质子和 2 个中子）可以表示为 ${}_2^4\text{He}$ ，等等。有时，我们也会略去电荷数不写，直接记为 AX 。

当然，有一些特殊粒子有特别的记法，例如：由于电子的质量比核子的质量小得多，因此我们可以认为电子的质量数为 0、电荷数为 -1 ，表示为 ${}_{-1}^0\text{e}$ ，通常也记为 e^- ；电子的反粒子**正电子**（positron）就表示为 ${}_1^0\text{e}$ 或 e^+ ；中子不带电，表示为 ${}_0^1\text{n}$ ；**光子**（photon）既没有静止质量也不带电，用希腊字母表示为 γ ；**中微子**（neutrino）质量极小且不带电，用希腊字母表示为 ν （有 ν_{e} 、 ν_{μ} 、 ν_{τ} 三种“味”），等等。

元素的性质与原子核外的电子有密切的关系。同种元素的原子，质子数相同，核外电子数也相同，它们就会具有相同的化学性质。但是，它们的中子数可能不同。这些具有相同质子数而中子数不同的原子核组成的元素，在元素周期表中处于同一位置，因而互称**同位素**（isotope）。

原子核在其他粒子的轰击下产生新原子核的过程，称为**核反应**。在核反应中，质

量数守恒、电荷数守恒、能量守恒（通过[质能方程](#)联系）；但需要指出的是，质量本身通常不守恒。

一些恒星内部重要的核聚变

■ 氦聚变

氦聚变是红巨星以及超巨星内发生的核反应，在 $10^8 \sim 2 \times 10^8$ K 发生。其反应可以大致分为 3 步：

（1） ^8Be 的合成

^8Be 可以通过两个氦核聚变得得到。反应式如下：



然而 ^8Be 的比结合能低于 ^4He ，这也就意味着该反应吸热（从反应式中也可以看出）。此外，由于 ^4He 核的电荷大于 ^1H ，该反应比 p-p 链的启动更难，这也就意味着只有 ^4He 浓度很高的地方才能发生 ^8Be 的合成以及后续反应。

（2） ^{12}C 的合成

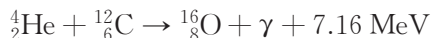
反应式如下：



其中 γ 代表光子。由于 ^{12}C 的比结合能比 ^4He 更高，所以该过程能够将上一步反应损失掉的能量全部补偿回来。使用 3 个 ^4He 合成 ^{12}C 的反应又被称为 3- α 反应 (triple-alpha process)。

（3） ^{16}O 的合成

反应式如下：



^{16}O 的比结合能更高，所以 ^{16}O 也是氦聚变的产物之一。此外， ^{16}O 还可以继续吸收一个 α 粒子生成 ^{20}Ne ，反应式如下：



此外该过程还包含 ^{14}N 吸收氦核生成 ^{18}F 以及 ^{18}F 放出 e^+ 生成 ^{18}O 的过程。

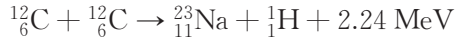
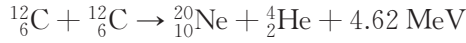
■ 金属聚变^④

（1）碳聚变

随着聚变的深入，恒星内核的温度变得越来越高。对于某些质量很大的中等质量恒星以及绝大多数大质量恒星来说，在聚变末期核心温度可以高达 7×10^8 K 以上。此时恒星内部更重的元素也可以发生核聚变。首先发生聚变的是碳元素，这个过程

^④ 在天文学中，金属指的是除了 H、He 之外的其他元素。

被称为碳聚变。其过程为两个碳原子首先碰撞生成一个极不稳定的、处于激发态的 ^{24}Mg ，然后立即放出一个质子或一个 α 粒子生成 ^{23}Na 或 ^{20}Ne 。反应式如下：



这一步生成的 ^{20}Ne 和 ^{23}Na 可以继续与核心区域的质子和 α 粒子等发生核聚变，生成 Mg、Al 等更重的核。

(2) 氖聚变

当恒星内部的温度超过 $1.5 \times 10^9 \text{ K}$ 的时候， ^{20}Ne 也可以发生聚变。和 ^{12}C 聚变不同的是，这一过程主要为 ^{20}Ne 与 α 粒子发生的反应，生成 ^{24}Mg 和 ^{28}Si 。反应式如下：

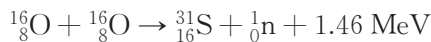
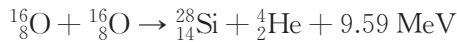


这一过程也伴随着 ^{20}Ne 的光致蜕变 (photodisintegration) 过程，即 ^{20}Ne 可以通过吸收光子，放出一个 α 粒子形成一个激发态的 ^{16}O ，这种氧原子核随即结合 α 粒子回到 ^{20}Ne 。在大质量恒星演化末期，光致蜕变导致的恒星内部元素丰度以及产能率的变化是不可忽视的。

这一过程中生成的 ^{24}Mg 和 ^{28}Si ，以及在之前碳聚变反应中生成的 ^{23}Na 还会继续与质子、 α 粒子反应，生成 Mg 和 Si 的其他同位素，以及 ^{27}Al 和 ^{31}P 。

(3) 氧聚变

当恒星内部的温度超过 $2 \times 10^9 \text{ K}$ 的时候， ^{16}O 开始发生聚变。 ^{16}O 的聚变过程和 ^{12}C 聚变类似，反应式如下：



通过上述过程生成的 ^{31}S 会迅速衰变为 ^{31}P 。

随后，该过程中生成的 ^{28}Si 、 ^{31}P 等核素同样会继续与质子、中子或 α 粒子反应，生成 S、Cl 和 Ar 甚至第四周期的 K、Ca、Sc 和 Ti 的多种同位素。

由于这一过程发生时恒星内部温度更高，这一过程中的光致蜕变更加明显。在氧聚变结束时，恒星内部会出现一种元素丰度接近平衡的状态，此时恒星核心主要为 Si 和 P 的同位素。

(4) 硅聚变

当恒星内部的温度超过 3×10^9 K 的时候， ^{28}Si 开始发生聚变。硅聚变过程与氦聚变类似，这是因为克服两个 ^{28}Si 发生碰撞的能垒所需要的温度可以使得所有元素发生光致蜕变。在高温下， ^{28}Si 通过光致蜕变分裂为激发态的 α 粒子，这些 α 粒子会继续与在上一步反应生成的重核发生反应，生成更重的元素。

这一过程最终会生成两组元素，一组是通过光致蜕变过程生成的，原子序数为 12 ~ 20 的轻核。另一组是通过上一步反应生成的重元素继续聚变，生成的原子序数为 22 ~ 28 的重核。在温度达到 5×10^9 K 时这些元素达到原子核的统计平衡，即高能光子导致原子核的光致蜕变，而这些碎片又会与其他粒子结合。此外，随着聚变的深入进行，每次聚变释放的能量总体上呈现降低的趋势。二者共同导致了在硅聚变完成后，恒星因没有足够的能源对抗强大的引力而崩塌。

■ 黑洞的物理性质

无毛定理在数学上表明黑洞达到稳态后只具有质量、角动量和电荷三个独立的物理特性，其他的特征都消失了。如果这个理论是正确的，那么任意两个有着相同三个参数的黑洞将是全同不可分辨的。而这个定理是否适用于真实的物理世界仍是一个未解之谜。根据这个理论，黑洞达到稳态时只具有三个可观测参数，从而我们不能避免黑洞丢失进入它的物体的其他信息。黑洞的这个性质过于诡异并且仍是目前的一个研究热点，即黑洞信息丢失悖论。

最简单的黑洞为史瓦西黑洞，它只有质量而没有电荷或角动量。根据伯克霍夫 (Birkhoff) 定理，史瓦西解是真空爱因斯坦方程的唯一球对称解，从而在一定距离处史瓦西黑洞产生的引力场和等质量球对称物体产生的引力场将没有可观测的区别。我们通常说的黑洞“吞噬一切临近物体”其实只在黑洞视界附近才成立，在更远的地方它和一个等质量物体的引力场其实没什么区别。

根据广义相对论，人们也找到了描述更一般黑洞的解，例如：赖斯纳-努德斯特伦 (Reissner-Nordström) 度规描述了无自转带电黑洞、克尔 (Kerr) 度规描述了不带电旋转黑洞、克尔-纽曼 (Kerr-Newman) 度规描述了带电旋转黑洞。这些模型共同表明，黑洞的质量是可以任意取值的，而黑洞的电荷和角动量却受到质量的约束，其总电荷 Q 和总角动量 J 应该满足

$$\frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0} + \frac{c^2 J^2}{GM^2} \leq GM^2$$

虽说的确存在不满足这个条件的爱因斯坦方程的解，但是这些解不存在视界而存在外部可观测的“裸奇点”——这被认为是“不物理的”。彭罗斯提出的宇宙监督法则禁止物质在引力作用下坍缩时形成这种裸奇点，数值相对论进行的模拟计算在相当大的程度上支持了这一法则，不过这一法则尚未在数学上被严格证明。

我们一般认为星体坍缩成的黑洞会保持原来星体的近电中性，同时角动量守恒会为它带来极高的自转速度。学界通常根据质量的量级对黑洞进行分类： $10^5 \sim 10^{10}$ 个太阳质量的为超大质量黑洞； 10^3 个太阳质量的为中等质量黑洞；10 个太阳质量的一般为恒星级黑洞而月球质量量级的为微型黑洞。

■ 黑洞的结构

事件视界是黑洞主体的最外层。它是时空中的一个边界，在此边界以内物质和光都只能落向黑洞中心而无法逃到视界以外。广义相对论预言带质量的物体会弯曲时空并使得粒子的轨迹向该物体弯曲，而在黑洞视界处这种弯曲是如此强烈以至于没有任何轨迹能够逃离黑洞。静态黑洞的事件视界是一个球面，而旋转黑洞的视界是一个椭球面。

对于远处的观察者而言，黑洞附近的时间会因为引力流逝得更慢，这使得他们看到的落入黑洞的物体在接近视界时越落越慢以至于需要花无穷长的时间到达视界。并且由于引力红移，远处观察者看到这个物体发出的光也越来越红、越来越昏暗，最后这个物体发出的光过于微弱以至于再也不能被观察者感知。事实上变暗的这个过程发生的很快，所需时间一般不超过 1 秒。^{④③}

另一方面讲，如果一个坚不可摧的观测者落入了黑洞，他在穿过事件视界时不会感受到任何上述效应。他的时间在正常地流逝、他用有限的时间穿过了视界而没有感受到任何奇性带来的效应。根据爱因斯坦的等效原理，在经典广义相对论中这个落入黑洞的观察者永远无法确定事件视界的位置。

广义相对论预言在视界以内的黑洞中心会存在一个引力奇点，这是一个时空曲率无限大的区域。对于无自转的黑洞而言这就是一个“点”；而对于有自转的黑洞，这是旋转平面上的一个“环”。在两种情况下奇性区域的体积都为零并且包含了黑洞的所有质量。从而这个区域的密度可以被认为是无穷大。落入史瓦西黑洞的观测者会在穿过视界后不可避免地落入奇点。落入奇点时他们的密度也会被压缩到无穷大并为黑洞增添一份质量。在此之前他们会因为奇点附近极强的潮汐力而被拉伸成长长的面条状。

不过对于带电或者旋转的黑洞而言，观察者进入视界后或许可以避免落入奇点。通过把这两类黑洞的解尽可能地延拓，人们发现此时黑洞表现的就像连接着另一个宇宙的一个虫洞。不过这个虫洞只在理论上可能存在，因为目前理论表明现实中任意微小的扰动都会破坏这个虫洞。同时人们发现观察者或许可以沿着绕克尔黑洞奇点的封闭类时曲线运动而在视界内避免落入奇点，不过这又会带来外祖母悖论这样的矛盾。同时，目前的主流观点认为奇点的存在暗示着广义相对论是一种不完备的理

^{④③} John Baez. What happens to you if you fall into a black hole?[EB/OL]. 1995.

论，我们实际上应当考虑奇点处高密度粒子间相互作用带来的量子效应。但是至今我们都无法把量子 and 引力效应完美地统一在单个理论中，不过我们有理由相信在这样的统一理论里上述疑难问题会彻底消失。

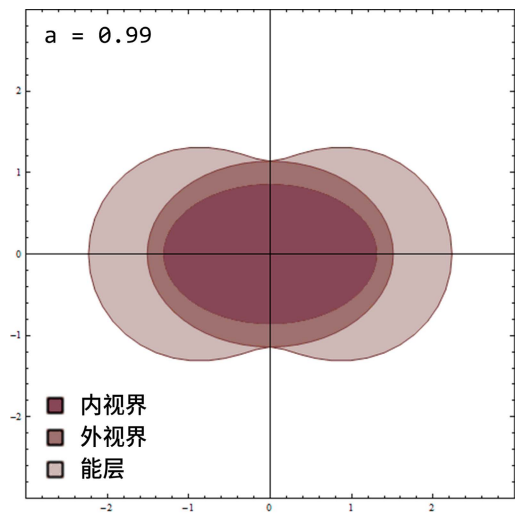


图 6.29 黑洞视界与能层的示意图。图片来源：[Visser M. The Kerr spacetime: A brief introduction\[J\]. arXiv preprint arXiv:0706.0622, 2007.](#)

黑洞视界外存在一个光子俘获区域，叫做“光子层”(photon sphere)，这是一个厚度为零的球面边界。沿着这个球面切向运动的光子会被约束在一个绕黑洞的圆形轨道上。对于无自转的黑洞而言，这个光子层的半径大约为史瓦西半径的 1.5 倍。光子在这里的轨道实际上是不稳定的，任一微扰造成的影响都会随时间不断增长并使得光子要么向外逃逸要么向内落入视界。在旋转黑洞外还有一块区域叫做“能层”(ergosphere)，由于参考系拖曳效应在这里的物体不可能保持静止：广义相对论预言任意带质量的物体旋转时都会拖拽周围的时空，使得靠近这个旋转物体的任意物体都倾向于沿着旋转的方向运动。对于旋转黑洞而言，这一效应是如此之强以至于视界附近的物体需要沿着反方向以超光速运动才能保持静止。能层的外边界叫做“能面”(ergosurface)，这个曲面在极点处与视界相切，在赤道处远离视界向外凸出。一般上在能层中的物体和辐射能够逃离黑洞的引力约束，而通过彭罗斯过程，物体可以从能层中提取到来自黑洞旋转能的能量。将这一机制推广到有强磁场的情况便得到了布兰德福-日纳杰(Blandford-Znajek)过程，这种机制可以解释类星体和活动星系核的超高亮度和它们发出的相对论性射流。

● 黑洞的形成与演化

由于黑洞具有种种病态的性质，长久以来人们都怀疑这只是爱因斯坦方程的病态解而不是真实的物理存在。爱因斯坦本人也认为坍缩时粒子的角动量守恒会使得它们在某个半径处保持稳定运动而不会形成黑洞。这使得很长一段时期内主流研究者都认为黑洞只是理论上的魅影。但是有一小撮物理学家始终坚持黑洞是真实存在的，并且在上世纪 60 年代他们终于说服了其他物理学家没有什么机制能够阻止黑洞的形成。

彭罗斯证明了不考虑量子力学时形成视界必然会在视界内部形成奇点，不久后霍金证明许多描述大爆炸的宇宙解都存在奇点。黑洞的克尔解、无毛定理以及黑洞热力学定律表明黑洞具有非常简单的物理特性，使得它们成为了性质良好的研究对象。

传统的黑洞由引力坍缩产生，而大质量恒星在引力作用下坍缩被认为是恒星质量黑洞的起源。早期宇宙中恒星的形成可能会产生很多大质量恒星，而它们的坍缩将会产生最大 10^3 个太阳质量的黑洞。这些黑洞可以成为大多数星系中心超大质量黑洞的前身。有人认为 10^5 个太阳质量量级的大质量黑洞可以由早期宇宙中的气体云直接坍缩形成，而这些黑洞可能会是我们观测到的某些早期类星体的真实面目，并且我们在对早期宇宙的观测中也的确发现了这类物体的候选者^{④⑤}。

引力坍缩需要极高的密度，在当今宇宙中这么高的密度只能在恒星中找到。但是大爆炸后不久的早期宇宙也具有这样的高密度态，而这可能会产生一些黑洞。不过均匀的高密度态并不会让质量集中分布并产生原初黑洞，此时我们还需要一些对密度分布的扰动。不同的早期宇宙模型对这种扰动大小的预言有着相当大的差异，进而它们预言的原初黑洞质量大至成千上万个太阳质量，小至 10^{-8} kg^⑤。

黑洞并不一定要靠引力坍缩才能产生，事实上它也可能在密度足够高的高能碰撞中形成。不过人们普遍认为这一过程所需的能量极高以至于超出了人类现有的技术水平。一些量子引力理论的研究表明在某些低能碰撞也可能产生微型黑洞，但是这一观点并没有得到广泛支持，并且即使我们能够在地球上产生这种黑洞，它也会因为霍金辐射在 10^{-25} 秒内蒸发殆尽而不会对地球造成威胁。

黑洞形成后能够通过吞噬其周围的物质持续长大，这一过程也是形成超大质量黑洞的一种可能方式。不过超大质量黑洞的具体形成机制目前仍有待研究。黑洞也可以和其他的恒星甚至黑洞并合，而这也是超大质量或者中等质量黑洞的一种可能的形成机制。1974 年，霍金预言黑洞并非完全的黑体，它们会释放微弱的热辐射，即霍金辐射。通过研究静态黑洞附近的量子场论，他发现黑洞发射的粒子会完美符合黑

^{④⑤} Pacucci F, Ferrara A, Grazian A, et al. First identification of direct collapse black hole candidates in the early Universe in CANDELS/GOODS-S[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 459(2): 1432-1439.

^⑤ Carr B J. Primordial black holes: Do they exist and are they useful?[J]. arXiv preprint astro-ph/0511743, 2005.

体辐射谱。霍金提出他的理论后，很多人都开始尝试用不同的方式来验证它。如果他的理论是正确的，那么黑洞会因为发射光子和其他粒子而损失质量，进而逐渐蒸发殆尽。黑洞热辐射谱的温度正比于它的表面引力，对史瓦西黑洞而言反比于质量，因此越小的黑洞霍金辐射越强。一个太阳质量的恒星级黑洞的霍金温度大约为 62 nK，这远低于宇宙微波背景辐射的温度（2.7 K）。从而恒星质量或更大质量的黑洞会从宇宙微波背景辐射中获得比霍金辐射损失的多的质量，从而它们会不断长大而非不断缩小。为了有高于 2.7 K 的霍金温度，黑洞的质量不能超过月球质量，而这种黑洞的直径将会低于 10^{-6} m。由于一般黑洞的霍金辐射相当微弱，从而在地球上探测它的难度极高，霍金的理论至今没有被实验直接证实。

第七章 深空天体

① 深空天体及其业余观测

所谓**深空天体**（deep-sky object, DSO），顾名思义，应当指的是位于遥远的太空中的天体。这个词常见于业余天文界，一般来说，指的是天上除太阳系天体（如行星、彗星、小行星）和恒星外的天体，一般包括星团、星云、星系以及活动星系；广义的深空天体还包括特殊的恒星天体（如双星、变星、超新星、白矮星和中子星等）。这些天体距离我们有相当遥远的距离，大多难以用肉眼观察。



图 7.1 蟹状星云（M1），位于金牛座，它是公元 1054 年超新星爆发的遗迹。这个星云的研究史可以说相当于半部天文学史。图片来源：<https://hubblesite.org/contents/media/images/2005/37/1823-Image.html>。

对于天文爱好者而言，深空天体虽然暗弱，但是它们大都异常壮丽，是星空中最令人陶醉的观测目标；在科学上，这些不同种类的深空天体是天体物理学重要的研究对象，天文学家们致力于探究它们的结构、起源和演化。在本章，我们将逐一介绍星团、星云、星系等各类深空天体的性质以及对它们的业余观测；在本章最后，我们还将了解整个宇宙的结构和演化，认识宇宙的面貌、历史和未来。

除少数明亮且易分辨的深空天体外，大多数不能用肉眼（指不使用任何观测设备，只用肉眼）直接观测。一部普通的双筒望远镜可以把你能看到的深空天体数目增加到上百个；如果你使用了口径更大的天文望远镜，能看到的数量会更多。

深空天体有着悠久的观测历史。著名的昴星团（M45）、鬼星团（M44）中的“昴”“鬼”就是中国传统星官体系二十八宿中的两宿；明亮的英仙座双星团早在公元前 130 年就被古希腊天文学家喜帕恰斯观测并记录了下来；18 世纪，法国天文学家梅西耶编纂了著名的梅西耶天体表，包含了 100 多个深空天体。随着照相术的发明和天文学的不断发展，深空天体表层出不穷，不断朝

着更暗、更远的方向前进。

② 深空天体的编号及梅西耶天体

也许你会好奇出现在上文中 M45、M44、M1 中的“M”究竟代表什么含义，下面我们就介绍一下深空天体的编号。

所有天体的名字都是由其所在的星表编号来确定的（当然亮星大部分通常有自己的名字，或者由所在星座和希腊字母或数字来编号，这其中是有历史文化的因素），深空天体也不例外——这样，通过统一的编号就可以立即检索到该天体，方便了研究和交流。并且，不同的人也编写了不同的星表，因此对于同一天体可能有不同的编号，例如 NGC 1432 和 M45 都指的是昴星团。而对于深空天体，常用的星表有**梅西耶天体总表**（M）、**星云和星团新总表**（*New General Catalogue*, NGC）、**星云和星团索引星表**（*Index Catalogue*, IC）。其中收录较全的是 NGC 星表（含 7840 个天体）和 IC 星表（含 5387 个天体），它们几乎收录了业余天文爱好者所能观测到的全部星团、星云及星系，这些天体中的大多数十分暗弱，只有少部分适合普通的天文爱好者观看。

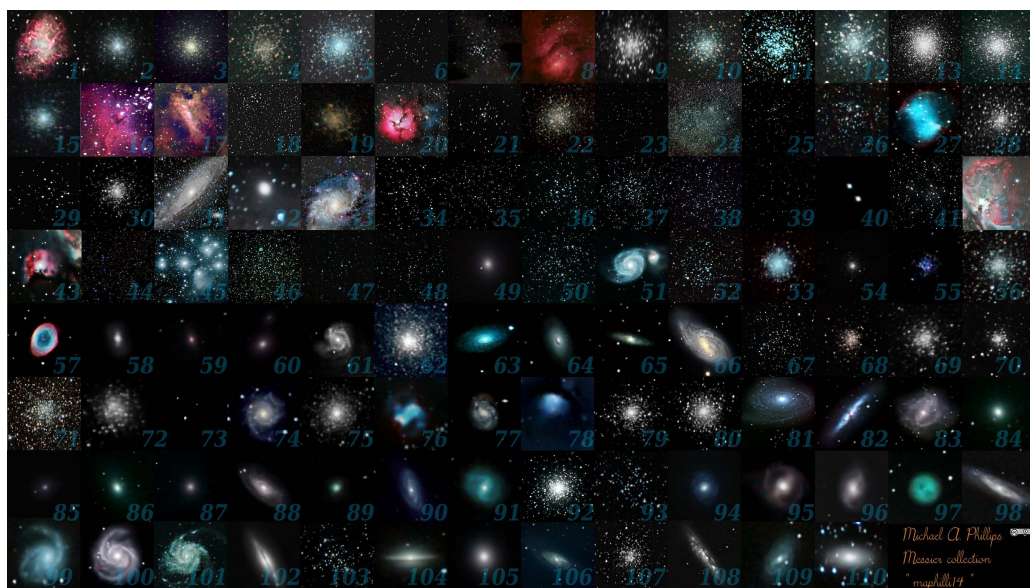


图 7.2 全部的梅西耶天体。图片来源：<http://astromaphilli14.blogspot.com/p/m.html>。

而**梅西耶天体**是 18 世纪法国天文学家梅西耶（Messier）所编的《星云星团表》中列出的 100 多个天体。梅西耶是个彗星猎手（comet hunter），他结集这个天体目录是为了把天上形似彗星而不是彗星的天体记下，以避免彗星猎手们寻找真正的彗

星时和这些天体混淆。现行的梅西耶天体表中共 110 个深空天体，其编号以 M 开头，由 M1 排到 M110。

梅西耶天体均为比较明亮的深空天体，在良好的条件下，利用双筒望远镜就可以观测一半以上的目标，利用 100 mm 左右口径的望远镜就可以一览无余，因此是天文爱好者常年进行观测的对象。每年 3、4 月份，太阳位于梅西耶天体相对较少的区域，因此在北半球中纬度地区，有可能能够一晚上看到 100 个以上的梅西耶天体，此种观测活动被称为**梅西耶天体马拉松**，通常简称为“梅马”。

如果你想了解全部梅西耶天体的信息，可以参考如下网站：<http://astropixels.com/messier/messiercat.html>，这是一个英文网页，包含了梅西耶天体表和其中各个天体的详细信息。

③ 星团

■ 疏散星团和球状星团

作为深空天体中较容易观察的一类，**星团**（star cluster）长期以来广受全世界的天文爱好者追捧。星团是指相互之间存在物理联系（引力作用）的恒星集团。一般按照形态结构分为**疏散星团**（open cluster）以及**球状星团**（globular cluster）。二者形态的区分很明显，读者可以通过观察以下两幅图片，看出它们的差别。



图 7.3 左：昴星团（M45），疏散星团；右：武仙座球状星团（M13）。昴星团周围的星云气体我们下一节还会提到。图片来源：Wikipedia。

由至多数百颗恒星组成的，结构松散、形状不规则的星团称为**疏散星团**，它们主要分布在银盘^①上，因此又叫做银河星团。由于疏散星团的引力束缚很弱，它们很容易在演化过程中被银盘上其他天体（譬如分子云和其他星团）的引力瓦解掉，因而疏散星团往往非常年轻，对于绝大多数的疏散星团，其成员星的年龄至多为数千万年。

^① 银盘及后面出现的银晕的概念，参见本章第 5 节。

疏散星团诞生于星际分子云之中。分子云的坍缩形成大量的各种质量的恒星，此后在辐射压和星风的作用下分子云被吹散，在这个过程中若恒星仍然被彼此的引力束缚在一起，就形成了疏散星团。疏散星团往往富含高温的蓝色 O、B 型恒星，这是因为尽管 O、B 型恒星寿命很短，但疏散星团能够稳定存在的时间也很短暂，在这些短命的大质量恒星死亡前，疏散星团往往已经瓦解了。所以大多数疏散星团都由那些最亮的蓝色主序星所主导。

由几万颗到几十万颗恒星组成的，整体呈球形、结构致密、越靠近中心恒星越密集的星团称为**球状星团**。按照星团中心的恒星密集程度，人们将球状星团分成了从 I 到 XII 这 12 个级别，级别越小密集度越高，这种分类方法称为**夏普利-索耶集中度分类法**（Shapley-Sawyer Concentration Class）。球状星团大致球对称地分布在银晕中，银河系中大约有 150 个球状星团，它们往往以高度离心的椭圆轨道绕着银河系中心公转。



图 7.4 左：M75，位于人马座；右：Palomar 12，位于摩羯座。它们分别是 I 和 XII 级的球状星团。图片来源：Wikipedia。

球状星团往往非常古老，其成员星大多是非常年老、贫金属的小质量恒星。这些恒星的年龄和银河系一样古老，只比宇宙本身的年龄（137 亿年）要年轻几亿年。因为那时的宇宙环境中十分缺少金属元素（它们主要由恒星的热核聚变合成），所以这些恒星的金属丰度非常低，因此球状星团也被称为星系形成时期的“活化石”。由于它们经历了漫长的演化，所以如今可见的成员星以黄色和橙色的小质量恒星为主。但是球状星团中也有非常稀少的蓝色恒星，称为“蓝离散星”，人们推测它们起源于星团中恒星的碰撞并合。

星团的业余观测

在狭义的深空天体定义（星团、星云、星系）中，同等亮度条件下，星团应当是其中较容易观测的一种——梅西耶天体表的 110 个天体中，有 55 个是星团，这从侧面反映了天空中明亮星团之繁多。

疏散星团分布在银道面附近，因而适合看疏散星团的季节正是适合看银河的季节。对于北半球观测者而言，夏秋冬都是适宜观测疏散星团的季节，英仙座双星团（NGC 869 和 NGC 884）、昴星团（M45）、鬼星团（M44）都是肉眼可见的目标；利用普通的双筒望远镜，在良好的条件下可以看到更多的疏散星团，诸如 M6、M7、M11、M34、M35、M41 等等——几乎梅西耶天体表中所有疏散星团都可以轻松斩获，甚至一些 NGC、IC 天体表中的疏散星团也不是什么困难的目标。在低倍、较大视场中，你可以看见疏散星团中的恒星一颗颗挤在一起，而周围星星较为稀疏；在高倍下，你可以在疏散星团里一颗颗地“数星星”——这是一件很有趣的事情，每次观测的条件都会有略微的差别，能看到的恒星数自然也不尽一致。

球状星团在望远镜中形似毛茸茸的小球，一般的小口径望远镜很难将球状星团分解出单个的恒星（球状星团普遍太过遥远，成员星年龄较老、亮度偏低）。最亮的球状星团——半人马座 ω 位于南天，不适合北半球观测者观看；北天最明亮的球状星团当属武仙座球状星团（M13）。很多观测者会认为球状星团目视看起来长相类似，没什么意思，但实际上每个球状星团的具体形态、致密程度、大小还是略有区别的，相信读者会在观测星团的过程中找到乐趣。

4 星云

星云简介

提到星云，我们或许都不陌生——许多人因为一张张美丽的星云照片，走上了天文爱好者的道路。

宇宙空间中气体或尘埃形成的云称为星云（nebula）。星云按照发光性质分为暗星云（dark nebula）、发射星云（emission nebula）、反射星云（reflection nebula）；按照形态划分，可以分为弥漫星云（diffuse nebula）、行星状星云（planetary nebula）和超新星遗迹（supernova remnant）等。

① 此处使用的是 20 周年纪念版，不是原始版本。图片来源：<https://hubblesite.org/contents/media/images/2015/01/3471-Image.html>。

暗星云

能够遮挡后方的天体发出的可见光的星云称为暗星云。它们是冷而致密的分子云，其中的亚毫米尺度的尘埃颗粒能够有效地阻挡可见光的传播，但红外和射电波段的光则可以穿过暗星云。这类星云是孕育恒星和行星的温床，恒星和行星系统的形成过程在这样的星云中进行。最著名的尘埃暗星云当属位于猎户座腰带附近的马头星云。

发射星云

高温的恒星一般会伴随着强烈的紫外辐射。如果高温恒星附近有气体云，那么它将在恒星发出的紫外线的照射下激发或电离，发射出一些特定波长的光（在光谱中表现为发射线），这就是发射星云。星际气体以氢为主，氢原子具有著名的**巴尔末谱线系**（Balmer series），其在可见光波段有一条波长为 656.3 nm 的 H_α 谱线。它呈现红色，故多数发射星云是偏红色的，这样的星云也被天文学家们称作 **H II（电离氢）区**。此外，氦、氧、硫等很多元素也能以同样的机理发光，产生其他颜色的光。北美洲星云（NGC 7000）和加利福尼亚星云（NGC 1499）就是北天著名的发射星云，都呈现漂亮的红色。



图 7.5 左：加利福尼亚星云（NGC 1499，发射星云），形状酷似美国加州；右：马头星云（暗星云），黑色的部分酷似马头，其背景为红色的发射星云（IC 434），左下角明亮的蓝色部分（NGC 2023）是一个反射星云。图片来源：Wikipedia。

反射星云

星云内的物质由于反射沉浸在云内的恒星的星光而发亮，这样的星云称为反射星云。在这样的星云中，恒星的光不足以将星云中的原子充分电离，但足以将其照亮，所以反射星云的光谱是同照亮它的恒星一样的连续谱，而没有强烈的发射线。反射星

云最佳实例是昴星团周围的云气（可以参考图 7.3）。

■ 弥漫星云

顾名思义，呈不规则的弥漫形态的星云就是弥漫星云。弥漫星云中有发射星云，有反射星云，也有暗星云，还有多种发光性质结合的形态。最著名的弥漫星云也许就是猎户座大星云（M42）了，这是一个即使略有光污染也能肉眼可见的大星云，它既是发射星云，也是反射星云，在其周围还有暗星云的存在。

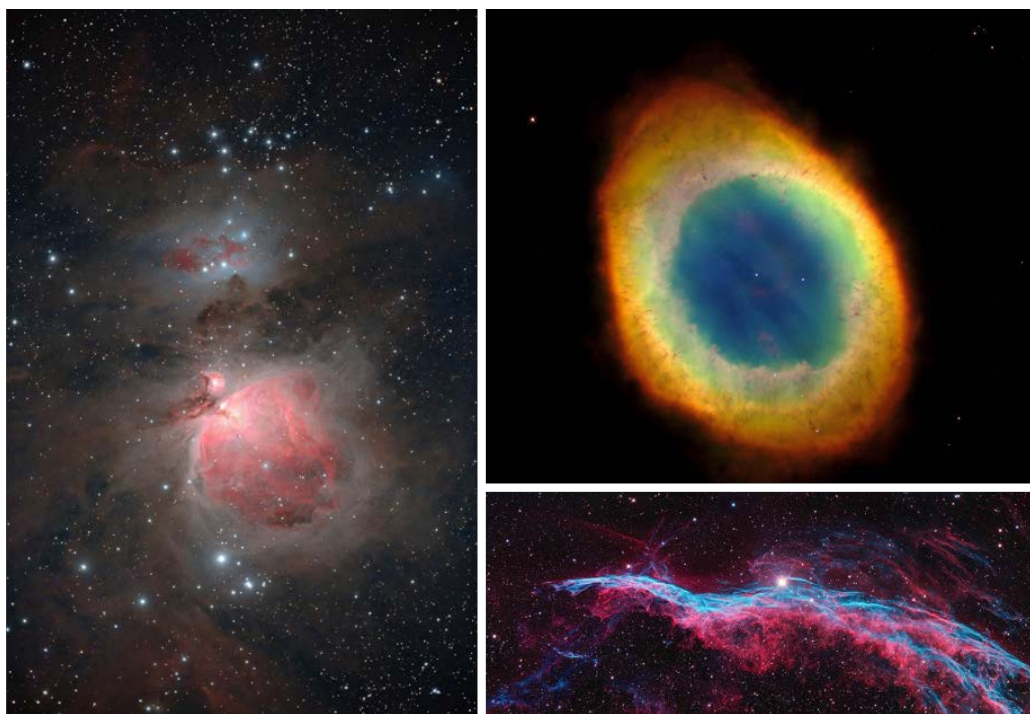


图 7.6 左：猎户座大星云（M42，弥漫星云）；右上：指环星云（M57，行星状星云）；右下：面纱星云（NGC 6960，超新星遗迹）。图片来源：Wikipedia。

■ 超新星遗迹

超新星遗迹是超新星爆发时抛出的物质在向外膨胀的过程中与星际介质相互作用而形成的延展天体，形状有云状、壳状等，差异很大。

最著名的超新星遗迹当属 M1 ——位于金牛座的蟹状星云，18 世纪由英国天文学家约翰·比维斯发现；随后人们又发现，这个天体就是中国北宋年间“天关客星”（超新星 SN 1054）的遗迹。到了当代，人们又在其中找到了超新星爆发的残骸——中子

星。可以说，这个超新星遗迹的研究史相当于半部天文学史。见图 7.1。

行星状星云

行星状星云是由小质量恒星在生命末期时抛射出的气体组成膨胀、发光外壳形成的一种发射星云。星云中心炽热的白矮星的辐射将外层的气体电离，使得这些气体产生发射线，这是行星状星云的发光机理。我们的太阳在大约 50 亿年后也将成为一个行星状星云。最著名的行星状星云当属指环星云（M57，天琴座）和哑铃星云（M27，狐狸座）。关于行星状星云的形成，可以参看第六章《恒星》中**恒星演化**一节。

星云的业余观测

星云一直备受广大深空摄影爱好者的青睐——弥漫星云大多明亮、绚丽、范围大，容易拍出壮美的摄影佳作。

不同种类的星云性质差别不小，难以一概而论。一般来说，利用普通的小望远镜是看不见星云具体颜色的，就连很多星云的细节也很难分辨，跟一张张精美的照片比起来肯定是大打折扣。有这么一种说法：如果让一个普通人看一眼目镜中的弦月或者土星，他可能会疯狂地爱上天文；但如果让一个普通人看一眼目镜中的星云，他或许会对天文丧失兴趣。

星云的观测比起星团而言肯定是较为困难的，更讲究技巧和经验（常常需要运用侧视法^②等观测技巧），考虑到星云各异的发光性质，很多爱好者在观测星云时会选择使用不同规格的滤镜，以排除不必要的其他波长光的干扰。

5 星系

宇宙中的星系

星系（galaxy）是通常由几亿至上万亿颗恒星、大量的星际气体、尘埃和暗物质构成的引力束缚的天体系统。我们太阳所处于的银河系就是一个星系。天文学家推测，可见宇宙中约有 2000 亿个星系^③。星系的大小彼此差异很大，典型的矮星系拥有数千至数十亿颗恒星，而最大的巨星系（如 IC 1101）则拥有 10^{14} 颗之多的恒星。它们中有的离我们较近，可以清楚地观测到它们的结构；有的非常遥远，目前已知的最远的星系距离我们超过 130 亿光年。

为了研究方便，美国天文学家哈勃按照星系的形态将星系大致分为**椭圆星系**（E）、

^② 将要观测的目标放在偏离视野中心 10° 左右的位置，用余光观察，目标的感官亮度可能会有增加。这种现象的产生与人类视网膜的构造有关。感兴趣的读者可以参考文献：Alexander R G, et al. Gaze Mechanisms Enabling the Detection of Faint Stars in the Night Sky[J]. European Journal of Neuroscience, 2021.

^③ 引用来源：Wikipedia 的 Galaxy 词条。

旋涡星系 (S)、棒旋星系 (SB)、透镜星系 (S0) 和不规则星系 (Irr)。这种分类法称为哈勃星系分类法。

同时各类星系可按照形态的差异，再细分为几小类，下面简要介绍之：

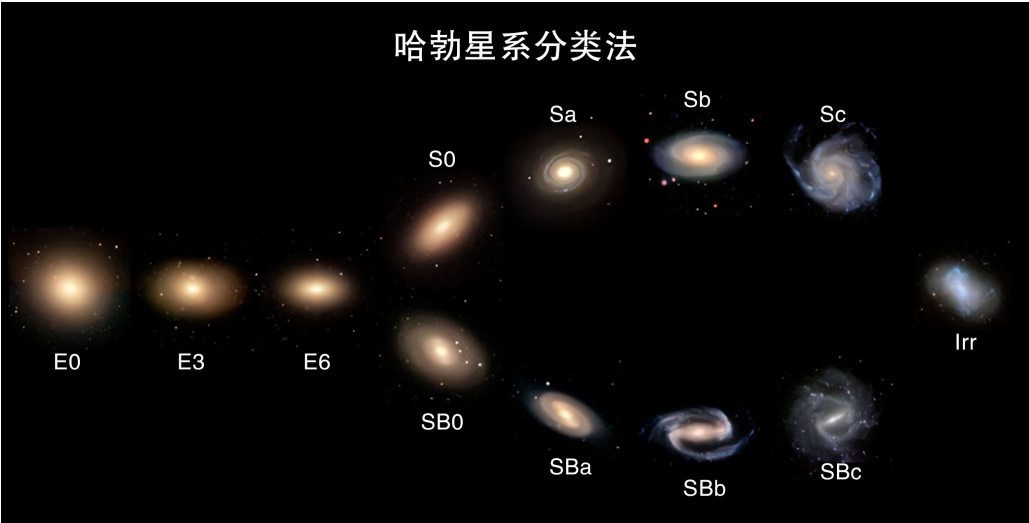


图 7.7 哈勃星系分类法示意图，左边是椭圆星系，上边是旋涡星系，下边是棒旋星系，右边是不规则星系。由于排列有点像音叉（如果不算不规则星系的话），所以往往又被称为“哈勃音叉图”。

椭圆星系 (elliptical galaxy) 外形呈卵形，看起来是椭圆形或正圆形。按照椭球的扁平程度，可以细分为 8 个次型：E0，E1，E2，……，E7。阿拉伯数字越大代表椭圆星系越扁。最著名的椭圆星系当属 M87，为 E0 型，它是宇宙中最大的星系之一。

透镜星系 (lenticular galaxy) 是一类介于椭圆星系和旋涡星系的过渡类型，它像旋涡星系一样扁平，但却看不见旋涡结构，也没有旋臂。这类星系示例较少。

旋涡星系 (spiral galaxy) 的特征是有由中心核球螺旋式地伸展出去、像车轮状包围着星系的旋臂，成旋涡状。旋涡星系一般按中心核球的突起程度和旋臂缠绕的松紧分成三大次型：Sa，Sb 和 Sc，其中 Sa 星系中心的核球最大，旋臂收得最紧。最著名的旋涡星系当属仙女座大星系 M31，为 Sb 型，这是一个肉眼可见的明亮星系，是银河系的邻居。

棒旋星系 (barred spiral galaxy) 的核心部分具有一个亮的棒状结构，棒的两端向不同方向延展出旋臂。根据核球大小和旋臂缠绕的松紧程度，棒旋星系分为 SBa、SBb 和 SBc 三个次型，其中 SBa 型棒旋星系的旋臂缠得最紧。研究表明，银河系是一个棒旋星系。位于长蛇座的 M83 也是一个棒旋星系 (SBc)，它被称为南风车星系。

不规则星系 (irregular galaxy) 形状很不规则，它们形态向各个方向伸展。目前认为，不规则星系很可能是由于近邻星系的引力拖曳而失去了原形，也可能是正在经

历或刚刚结束碰撞、爆发。最亮的不规则星系当属大、小麦哲伦云了；对于北半球的爱好者，大熊座的 M82（雪茄星系）也许是比较有名的不规则星系。

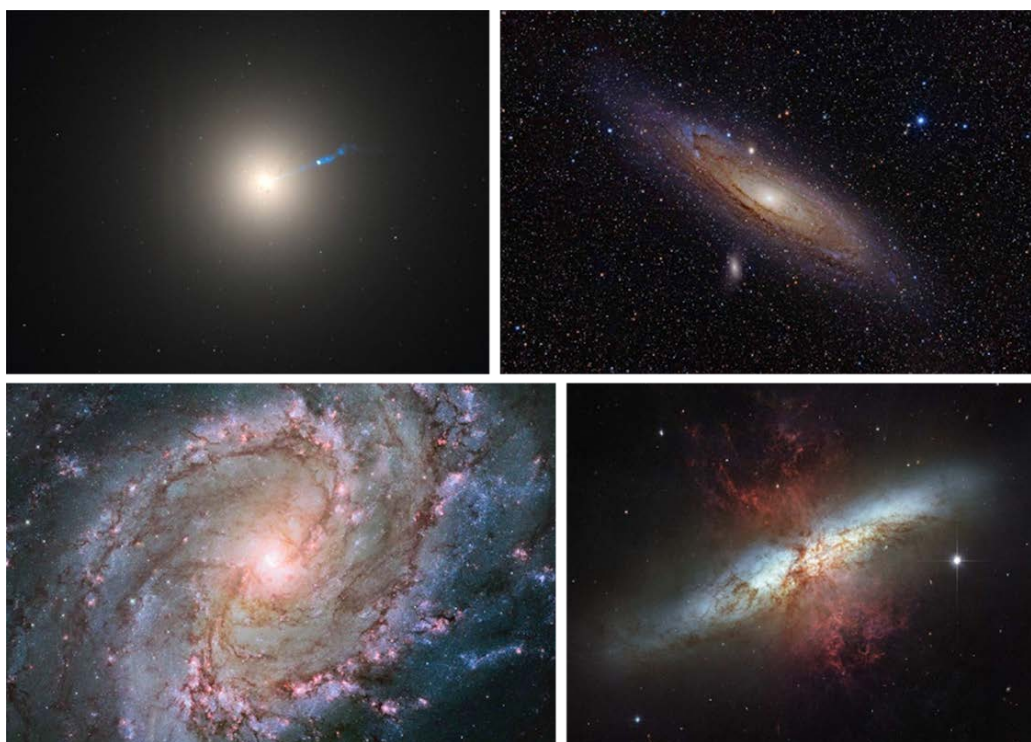


图 7.8 左上：室女 A 星系（M87，椭圆星系）；右上：仙女座大星系（M31，旋涡星系）；左下：南风车星系（M83，棒旋星系）；右下：雪茄星系（M82，不规则星系）。图片来源：Wikipedia。

除了上述几类星系，宇宙中还存在许多特殊类型的星系。

当两个星系相互靠近，以至于彼此的引力对对方形态和运动施加影响，这样的星系称作**相互作用星系**（interacting galaxy）。两个“擦肩而过”的星系可能在引力的潮汐作用下被拉扯，也可能互相交换气体和尘埃；星系之间也可能相互碰撞，引发剧烈的恒星形成活动，最终可能并合成一个更大的星系。

有一些星系具有异常剧烈的恒星形成活动，被称为**星暴星系**（starburst galaxy）。这样的星系中具有大量年轻炽热的恒星，并有大面积的电离氢区（红色的发射星云），且有超新星频繁爆发的痕迹。当星系中的冷气体逐渐耗竭、被加热或变得弥散后，星暴活动停止。星暴星系在宇宙的早期更为常见。

一部分星系具有在全部或部分波段异常明亮的星系核，其亮度甚至远高于星系中全部恒星的总亮度，称为**活动星系核**（active galactic nucleus，AGN），其宿主星系则被称为**活动星系**。根据不同的观测特征，人们将活动星系分为**塞弗特星系**（Seyfert

galaxy)、类星体 (quasar)、耀变体 (blazar) 等许多不同的类型。根据活动星系核的物理模型，星系中央的超大质量黑洞吸积周围的物质，这些物质向黑洞掉落的过程中，其释放的引力势能转变为电磁辐射，成为了活动星系核发光的能量来源。

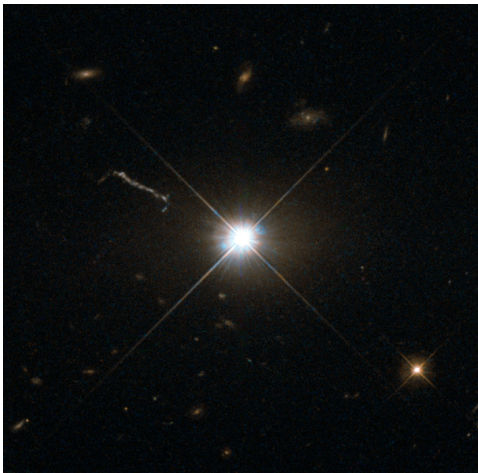


图 7.9 相互作用星系 NGC 4038 和 NGC 4039，图 7.10 类星体 3C 273。图片来源：Wikipedia。它们同时也是星暴星系。图片来源：Wikipedia。

银河系

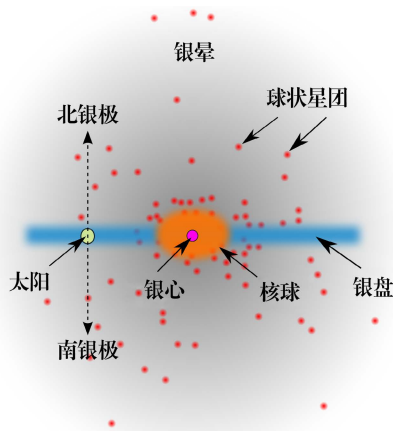


图 7.11 银河系剖面的示意图。图片来源：Wikipedia。

北半球的人们在盛夏、秋初的晴朗夜晚仰望星空，会看到一条淡淡的光带从东北向南横贯天穹，宛如奔腾的河流一泻千里，这就是我们太阳系所在的家园——银河系。

目前的研究认为，银河系应该是一个 SBc 型（或 SBbc 型）棒旋星系。银河系的外貌像一个中间突起的透镜，直径约为 50 kpc，厚度约 1 ~ 2 kpc。它的主体是银盘，众多的高光度亮星、银河星团和银河星云组成了漩涡结构，位于银盘上。

在银河系内大约有 1 ~ 4 千亿颗恒星，其中人们能用眼睛直接观察到的只有大约 6000 颗较近和较亮的星；银河系内还有众多的亮星云、暗星云、星团和无数的弥漫星际气体和尘埃物质及神秘的暗物质。

许多恒星、星团、星云和星际物质密集在银河系中心平面附近，称为**银盘**；银河

系的银盘中心隆起的球形部分叫**核球**，它是恒星和星际物质密集区；在核球最里层距银心约 3 kpc 范围内的恒星致密区叫**银核**，那里有最密集的恒星群及电离气体、分子云和尘埃，其中心被称为**银心**，从地球上看到，银心位于人马座；银河系的厚盘外围是近似为球形的**银晕**，银晕的直径达 100 kpc，在这远离银河核心的银晕区，恒星和星际物质十分稀薄。

银盘上的恒星（以年轻恒星为主）、亮星云和其他天体成旋涡状分布，呈一种旋卷的状态，这种螺旋形的带状结构就被称为**旋臂**。银河系的旋臂结构目前仍然没有被完全确定，目前的研究认为，从银河系的核心展出 4 条旋臂：船底-人马臂、英仙臂、盾牌-半人马臂和矩尺臂。我们的太阳系位于一条分支旋臂——猎户-天鹅臂上。具体的旋臂结构可以参考图 7.12。

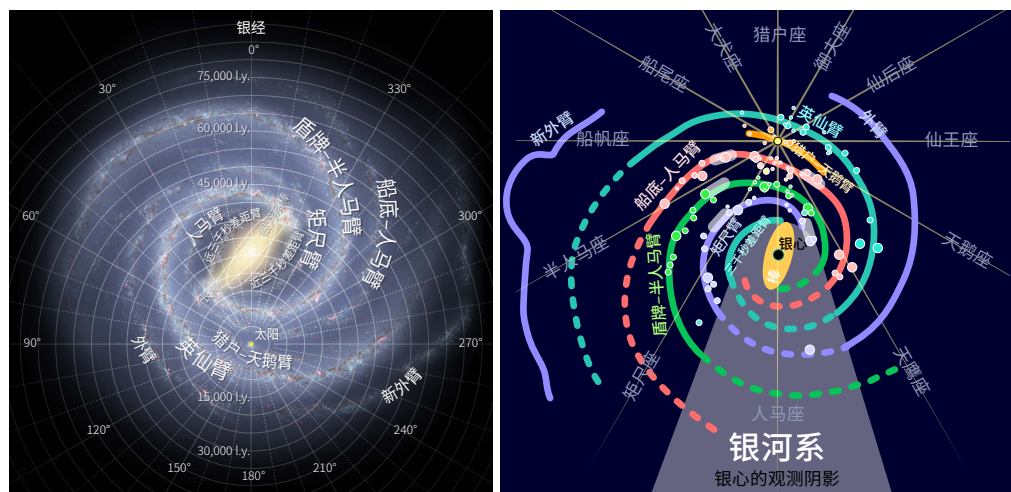


图 7.12 银河系结构示意图。太阳仅仅是猎户-天鹅臂（Orion-Cygnus Arm）上再普通不过的一颗恒星。图片来源：<https://www.eso.org/public/images/eso1339e/>。

从地球上看到，最壮丽的银河出现在夏季，此时我们面对的是银心的方向，看到的银河更加明亮稠密。在稍微远离光污染的地方，夏季银河是天空中不容错过的景观。夏季银河通过几个秋季星座（仙后座、英仙座等），与冬季银河相连。冬季银河论亮度逊于夏季银河，对观测条件要求更高，不过因为冬季亮星繁多，浅浅的银河与繁星映衬，也是极其壮美的景致。

星系的业余观测

星系的观测比星云更上了一个台阶——全天肉眼可见的星系少之又少，绝大多数星系都十分暗弱；同时，有的星系表面亮度较低，即便是望远镜对准了该目标，也需要很强的观测技巧才能看见。观测星系需要尽可能地远离光污染，并尽可能地使用口径较大的望远镜。

很多情况下，目视观测星系的品质依赖于当天的透明度，也许连续三个晴夜观测同一个星系，其影像会相差很多。适合观测星系的季节是春天（当然秋天也有一定数量的星系），这是因为遥远星系如果处在远离银河的方向，其发出的光被银河系中的星际介质吸收得会较少一些，更容易被观测到。夏季和冬季适合观看的星系数量相对较少，就是因为这两个季节里银河横贯苍穹，银盘附近星系的光都被河内的物质遮掩了。

⑥ 宇宙

宇宙简介

在前面的章节中，我们按照尺度由小到大的顺序，逐一认识了太阳系内的天体、恒星、星团和星云以及星系。那么，在星系之上，宇宙中是否还有更大尺度的结构？宇宙的整体面貌又是什么样子呢？这是本节所要讨论的问题。

古往今来，不同时期、不同地域的文明曾提出过诸多不同的见解，如中国的浑天说、西方古代的地心说体系等。近代以来，随着天文学观测技术的发展，人们得以利用自然科学的方法研究越来越遥远的天体，逐步加深了对宇宙结构的认识；而基础物理的突破让人们时空本身的性质以及宇宙的演化历史有了全新的理解。人们可以将作为一个整体的宇宙的性质作为一门科学来认识和研究，这就是**宇宙学**（cosmology）。

像恒星聚集成星团和星系一样，星系也会在引力的作用下聚集成团，形成星系群、星系团、超星系团和宇宙大尺度结构等不同层次的天体系统。这些结构并非一成不变，而是随着时间不断演化。宇宙的空间本身也不是静态的，而是随着时间不断膨胀的。宇宙的膨胀会影响宇宙中物质的存在状态和运动，物质组成和状态也会反过来影响宇宙的膨胀。目前的理论和观测表明，宇宙从诞生至今的年龄约为 137 亿年，它从原初高温高密的状态演化至今，形成了我们介绍过的各种各样的天体，并在一个微不足道的角落中孕育了地球和生命，以及热爱仰望星空、认识宇宙的我们。

宇宙的结构

在大尺度上，星系成为了宇宙中物质的基本单元，正如恒星聚集成星团和星系，星系在更大的尺度上也会聚集成团，星系组成的集团构成了大尺度宇宙的基本面貌。

由十个至几十个星系组成的引力束缚的天体系统叫**星系群** (galaxy group)。我们的银河系就是一个星系群的成员，它还包含仙女座大星系、三角座星系以及众多较小的星系，尺度大约为 3 Mpc，这个星系群被称为**本星系群** (Local Group)。



图 7.13 室女座星系团。图片来源：APOD (<https://apod.nasa.gov/apod/ap150804.html>)。

如果一个彼此引力束缚的集团中的星系有几百到几千个，这样的集团就称作**星系团** (galaxy cluster)。星系团是比星系群更大的星系集团，也是宇宙中尺度最大的引力束缚系统，也就是在宇宙的膨胀中能够保持相对稳定的最大的天体系统。著名的室女座星系团 (Virgo Cluster) 就是一个星系团，其中包含了很多爱好者耳熟能详的星系，如之前提到的 M87，以及“草帽星系” M104。

星系群和星系团也可以聚集称为更大的结构，这样的天体结构称为**超星系团** (supercluster)。超星系团的尺度非常大，密度很低，它的引力不足以使自身在宇宙的演化之中维持束缚，它将随着宇宙的膨胀一起不断变大和变松散。我们的本星系群以及室女座星系团同属于一个超星系团，它被称为**室女座超星系团** (Virgo Supercluster)，它的直径约为 33 Mpc。据估计，整个可观测宇宙中约有 1000 万个超星系团。

2014 年的研究^④给出了超星系团的新定义方法，根据新的定义，我们的银河系位于**拉尼亚凯亚超星系团** (Laniakea Supercluster) 中 (见图 7.14)，这个超星系团由原先定义的 4 个超星系团组成，它们是室女座超星系团、长蛇-半人马超星系团、孔雀-印第安超星系团以及南超星系团。

在更大的尺度上，超星系团的分布呈现出新的结构。星系密集的区域大致呈现

^④ Tully R B, Courtois H, Hoffman Y, et al. The Laniakea Supercluster of Galaxies[J]. Nature, 2014, 513(7516): 71-73.

条带状分布，被称为纤维状结构（galaxy filament），这些纤维状结构在空间中错综交叉，形成网状。纤维状结构之间的空间没有或者只有极少的星系，它们被称为宇宙空洞（cosmic void）。纤维状结构和空洞形成泡沫状，绵延于整个宇宙空间，又被称作“宇宙网”，这是宇宙大尺度结构（large-scale structure）的基本样貌。大尺度结构的典型尺度大约为 100 Mpc，参考图 7.15。

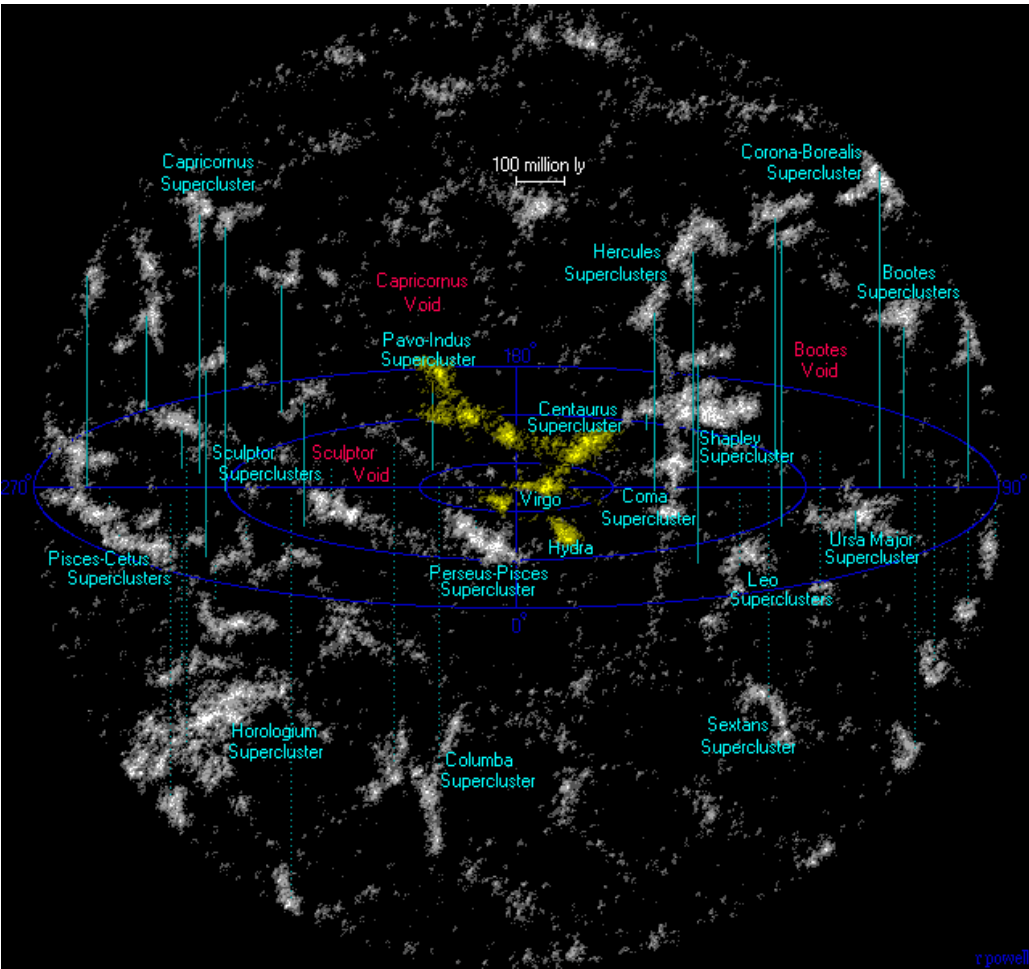


图 7.14 近邻宇宙中的超星系团结构，其中拉尼亚凯亚超星系团用黄色标出。图片来源：Wikipedia。

在大尺度结构之上，宇宙不再有任何已知的更大的结构，物质的分布呈现出高度的随机性，宇宙成为均匀和各向同性^⑤的，这是宇宙学原理（cosmological principle）的基本假设。

^⑤ 均匀指空间不同位置的物理性质完全相同，各向同性指空间每一个方向的物理性质完全相同。

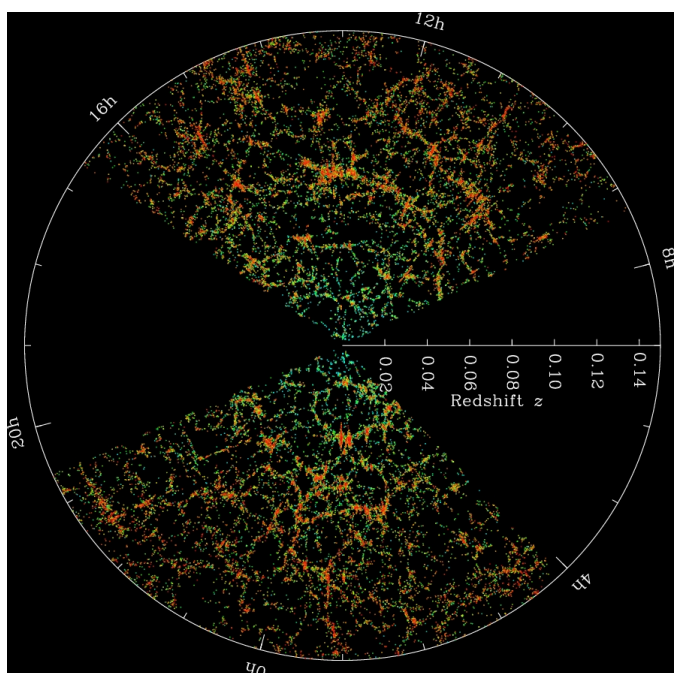


图 7.15 斯隆数字化巡天 (SDSS) 发布的大尺度结构。图片来源: <https://blog.sdss.org>。

宇宙的膨胀

在 20 世纪之前,人们长期相信宇宙是静态不变的,拥有无穷久远的过去和未来。但随着天文观测的延展和基础物理理论的突破,越来越多的证据表明宇宙并不是静态的,而是处于不断的膨胀之中。

1915 年,爱因斯坦发表了著名的广义相对论,此后,弗里德曼等人证明,依据广义相对论和宇宙学原理,一个静止不变的宇宙是不能稳定存在的。如果我们知道了宇宙中各种物质组分的密度,则可以计算出宇宙随时间演化的行为。

1929 年,埃德温·哈勃发表了他利用造父变星对河外星系的距离和相对速度的观测,观测数据表明,大部分星系都在远离我们而去,它们退行的速度大致与它们的距离成正比。后世的天文学家不断对这一结果进行进一步观测和校正,得到了著名的**哈勃-勒梅特定律**(Hubble-Lemaître law):统计上,银河系以外的星系正在远离地球,它们远离的速度与它们到地球的距离成正比,即

$$v = H_0 D$$

其中, v 是星系远离速率, D 是星系与观察者之间的距离, $H_0 \approx 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 就是著名的**哈勃常数**。

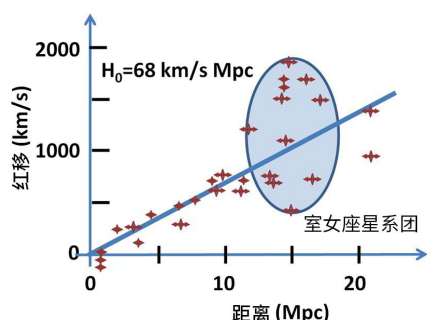


图 7.16 哈勃定律的拟合：星系的退行速度与距离大致成正比。图片来源：Wikipedia。

哈勃-勒梅特定律告诉我们，宇宙中的星系正纷纷远离我们而去，距离越远的星系远离得越快，就像身处一个不断吹胀的气球表面。这一结果启示我们：宇宙正在膨胀。

宇宙的膨胀意味着，在宇宙过去，物质彼此之间比现在要更加靠近，整个宇宙必将比现在更加致密和炽热。如果宇宙一直是膨胀的，那么在足够久远的过去，宇宙中的温度和密度势必会足够高，使得原子被电离成原子核和自由电子，光线不能在宇宙中自由地穿行，整个宇宙是不透明的，热辐射遍布整个空间。随着宇宙膨胀，物质变冷变稀薄，在某一时刻，原子核和电子重新复合成原子，热辐射开始不受阻碍地在宇宙空间自由传播，随着宇宙的膨胀不断变冷，如今辐射的能量主要处于微波波段，称为宇宙微波背景辐射 (cosmic microwave background, CMB)。

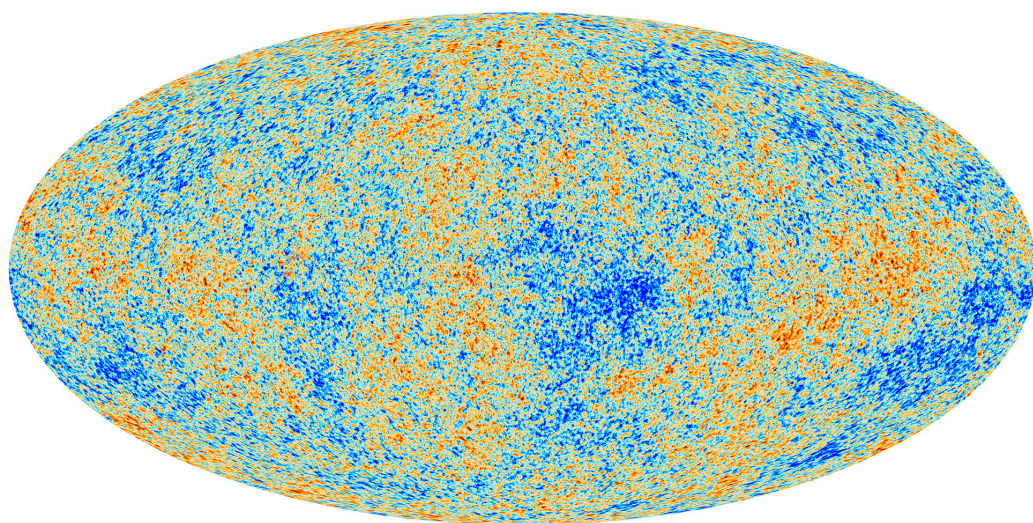


图 7.17 Planck 卫星探测到的宇宙微波背景辐射，其中的色阶代表辐射温度相对于平均温度的微小涨落，这些涨落蕴含着宇宙的结构信息。图片来源：https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_CMB。

1965 年，两位无线电工程师彭齐亚斯 (Arno A. Penzias) 和威尔逊 (Robert W. Wilson) 率先观测到这种背景辐射，这是宇宙膨胀的另一决定性证据，他们二人因此荣膺 1978 年的诺贝尔物理学奖。微波背景辐射蕴含了大量的宇宙结构信息，对它的研究成为研究宇宙演化的重要手段。

根据广义相对论，宇宙的演化历史由宇宙中各种物质和能量的组成所决定，不同的物质组成将导致宇宙以不同的方式演化。人们通过对 Ia 型超新星的观测发现，今天的宇宙正在加速膨胀，这一结果预示了**暗能量**（dark energy）的存在，它是一类人们尚未认知清楚的提供排斥力的能量。定量的结果表明，暗能量占据了宇宙如今全部的物质和能量的约 70%；剩余的 30% 之中，约 5% 是我们通常熟知的构成行星、恒星和星际介质的普通物质，也叫**重子物质**（baryonic matter），剩下约 25% 则是我们所不清楚的**暗物质**（dark matter）。也就是说，我们已经认知的宇宙中的物质只占宇宙中全部物质和能量的 5%。

详细的理论计算表明，宇宙的未来是有限的，存在一个时间原点 $t = 0$ ，宇宙中所有的事件都发生在它的将来。在这一时刻，宇宙的尺度无穷小，物质密度无穷高；换言之，广义相对论中的物理量出现了发散，这一理论在此处崩溃了，它被称为**大爆炸奇点**（primordial singularity）。由这一奇点出发、依据我们已有的物理定律构建的膨胀宇宙模型，被称为**大爆炸理论**（Big Bang theory）。本章的最后一小节将介绍大爆炸理论所给出的宇宙演化历史。

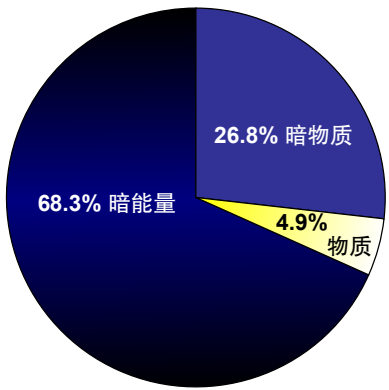


图 7.18 今天宇宙的组成成分。图片来源：Wikipedia。

宇宙的演化

在本小节中，我们将依据当今的标准宇宙学模型，以年表的形式介绍宇宙的历史和未来，从宇宙大爆炸开始，直至宇宙可能的未来结局。

$0 \sim 10^{-43}$ s: 这一时期是从大爆炸伊始至**普朗克时间**（Planck time）之前的宇宙，被称为**普朗克时代**（Planck epoch），宇宙的温度高于 10^{32} K。在这一时期内，我们已知的物理定律，包括描述引力与时空的广义相对论和描述基本粒子的量子场论，都是不适用的。人们认为，这一阶段的宇宙中，引力的量子效应是显著的，人们需要完备的量子引力理论来描绘这一时期的宇宙。

$10^{-43} \sim 10^{-36}$ s: 这一时期被称为**大统一时代**（grand unification epoch），宇宙的温度高于 10^{29} K。此时引力的量子效应不再显著，广义相对论开始适用；其余三种基本相互作用——强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用是统一的，由理论假设的**大统一理论**（Grand Unified Theory, GUT）所描述。这一时期结束时，强相互作用与电弱相互作用分离。

$10^{-36} \sim 10^{-32}$ s: 这一时期为**暴胀时代**（inflationary epoch）。在暴胀子（inflaton）（一种理论假设的原初量子场）的主导下，宇宙以指数方式膨胀，同时温度迅速

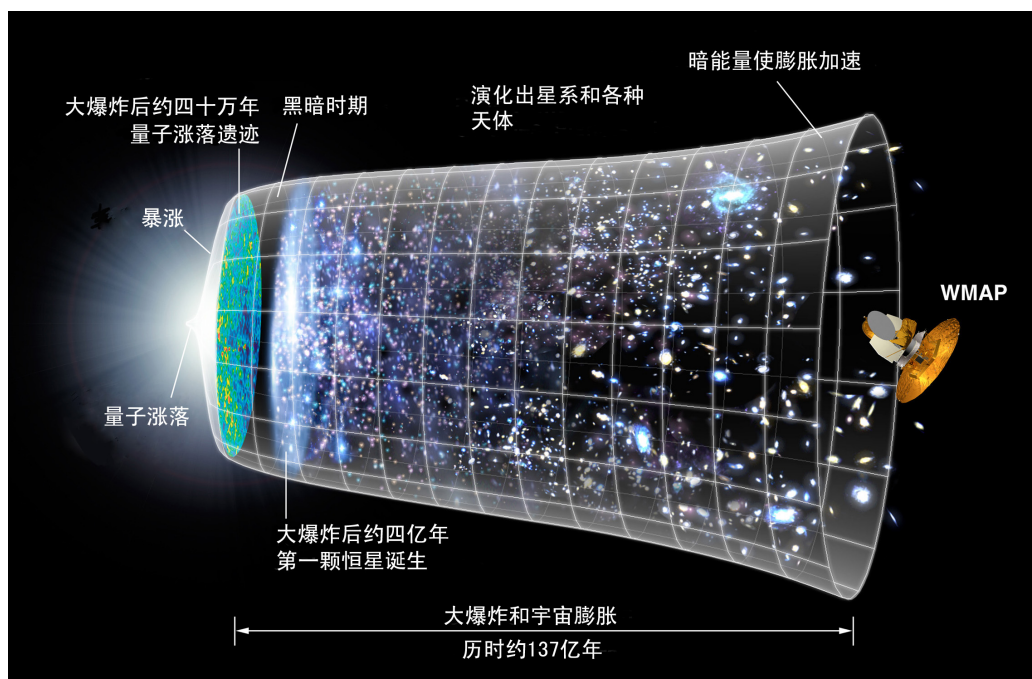


图 7.19 宇宙演化史图示，其中横坐标表示宇宙演化的时间，而对应的空间尺寸（不成实际比例）都用相应的圆横截面表示。图片来源：<http://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html>。

降低。暴胀的过程使得宇宙的几何形状变得十分平坦，使得原初宇宙中的量子涨落被放大至宇宙尺度，这种密度涨落成为了宇宙大尺度结构的起源。在暴胀结束后，暴胀子衰变为标准模型粒子，宇宙重新升温，这一过程称为**重加热**（reheating）。

$10^{-32} \sim 10^{-12} \text{ s}$ ：这一时期被称为**电弱时代**（electroweak epoch），宇宙的温度高于 10^{15} K 。此时的宇宙充满了由强相互作用和电弱相互作用主导的原初等离子体。电弱相变（electroweak phase transition）标志着电弱时代的结束，此时希格斯玻色子（Higgs boson）发生自发对称破缺，电弱相互作用分离为长程的电磁相互作用和短程的弱相互作用，标准模型中的费米子获得质量。

$10^{-12} \sim 10^{-5} \text{ s}$ ：这一时期被称为**夸克时代**（quark epoch），宇宙的温度为 $10^{15} \sim 10^{12} \text{ K}$ 。此时的宇宙中四种相互作用均已经分离，由于宇宙温度尚且较高，自由夸克尚未结合成强子，而是以夸克-胶子等离子体的形式存在。

$10^{-5} \sim 1 \text{ s}$ ：这一时期被称为**强子时代**（hadron epoch），宇宙的温度为 $10^{12} \sim 10^{10} \text{ K}$ 。随着宇宙温度降低，自由夸克发生色禁闭，被束缚进强子。由于正反物质的不对称性，多余的正物质剩了下来，组成了今天宇宙中全部的强子物质。到强子时代末期，只有稳定强子——质子和中子大量存在，它们通过弱作用互相转化，处于化学

平衡之中。随着宇宙温度降低，质子数和中子数之比逐渐增加，直到 $t \approx 1 \text{ s}$ 时，中微子退耦合，质子和中子的互相转化停止，质子与中子数之比固定为 6:1。

1 ~ 10 s: 这一时期被称为**轻子时代** (lepton epoch)，宇宙的温度为 $10^{10} \sim 10^9 \text{ K}$ 。此时宇宙的温度仍足以使光子转化为正负电子对，电子与正电子处于化学平衡中。

$10 \sim 10^3 \text{ s}$: 这一时期是**大爆炸核合成** (Big Bang nucleosynthesis) 发生的时期，宇宙温度进一步降低至 $10^9 \sim 10^7 \text{ K}$ 。自由的质子和中子被束缚进原子核，核合成结束时，宇宙中的原子核主要为 ^1H 和 ^4He ，此外还有痕量的 ^2H 、 ^3He 和 ^7Li 。

10 s ~ 37 万年: 这一时期被称为**光子时代** (photon epoch)，宇宙的温度从 10^9 K 降低到约 4000 K。此时的宇宙为原子核、电子和光子组成的等离子体，宇宙的温度不足以让自由电子与原子核结合成中性原子，光子与自由电子不断发生汤姆孙散射 (Thomson scattering)，整个宇宙是不透明的。

1.8 ~ 37 万年: 这一时期内，自由电子与原子核逐渐发生**复合** (recombination) 形成中性原子。在 4.7 万年时，宇宙中物质与辐射的能量密度相等，宇宙从辐射主导转变为物质主导。随着自由电子的数密度越来越小，宇宙对于光子变得越来越透明，在这一时期结束时，宇宙温度不足 4000 K，光子与物质**退耦** (decoupling)，开始在空间中自由传播，成为宇宙微波背景辐射的起源。

37 万年 ~ 约 2.5 亿年: 这一时期被称为**黑暗时代** (Dark Ages)，这是从光子退耦到第一代恒星形成之间的时期，宇宙中的光只有背景辐射和中性氢原子超精细跃迁辐射的 21 cm 光子，在可见光波段是一片黑暗的。

约 2.5 亿年 ~ 约 10 亿年: 这一时期被称作**再电离** (reionization)，第一代恒星和最早的星系形成，宇宙开始被重新“照亮”。从此开始，恒星发出的紫外光逐渐将星系际介质再度电离，到 10 亿年左右，宇宙中的绝大部分物质再度变成电离的。

约 2.5 亿年 ~ > 1000 亿年: 我们把这一段时间统称为**星光时代** (Stelliferous Era)，这一时期从第一代恒星形成持续到宇宙中的恒星活动完全停止。在宇宙年龄约 30 亿年 (红移 $z \approx 2$) 时，恒星形成活动达到极盛。在宇宙年龄为 98 亿年时，宇宙中的物质密度降低到与暗能量的密度持平，此后宇宙变为暗能量主导，由减速膨胀转变为加速膨胀。宇宙当前的年龄约为 137 亿年。随着形成恒星的致密冷气体被消耗殆尽，宇宙中恒星形成活动将趋于停止，待所有恒星燃烧殆尽，只有由简并物质组成的致密星将残余下来，宇宙逐渐变得黑暗。

宇宙的终极命运: 根据现有的物理理论，不同的物质组分和时空几何将导致宇宙拥有不同的结局。根据如今的观测数据，宇宙最可能的结局是所谓的大冻结 (Big Freeze，通常也称为**热寂**)。这一模型指出，宇宙在未来将一直膨胀下去，在遥远的未来，所有的恒星都将耗尽燃料而熄灭，致密星将随时间缓慢地冷却，微波背景辐射随着宇宙尺度的增加而变冷，即使是黑洞也将因霍金辐射而蒸发殆尽，整个宇宙将不

可逆地逐渐趋于绝对零度。

除此之外，理论上宇宙的可能结局还可能有大撕裂（Big Rip）、大挤压（Big Crunch）、大反弹（Big Bounce）等，它们都不被现有观测数据所支持，但也未被完全排除。

补充阅读

本章内容涵盖了十分丰富的天体物理知识，如果你在阅读本章时感到意犹未尽，希望更加深入地了解本章所述各种天体和天体系统的知识，或者有志于踏足相关专业领域，我们将为你推荐一些相关的书籍。

对宇宙中各类天体和宇宙学的概要性介绍，可以在主流的本科天文学入门教材中找到。内容较通俗、偏重于科普的书籍有刘学富所著的《基础天文学》和苏宜所著的《天文学新概论》，适宜所有人阅读。Karttunen 等人所著的 *Fundamental Astronomy* 是一本优秀的国外教材，它所讲授的内容要更深一些，适合有高中理科或大学普通物理背景的人阅读。如果对天体物理有强烈兴趣，并具有一定的物理相关背景，可以阅读北京大学徐仁新老师所著的《天体物理导论》。J. Binney 和 M. Merrifield 共同编著的 *Galactic Astronomy* 是一本百科全书式的教材，它对本章中出现过的各种天体进行了非常透彻的介绍。

若对某一类天体极感兴趣，可以阅读相应的专著教材。对于疏散星团和球状星团的动力学和演化有特殊兴趣的读者，可以尝试阅读 C. Clarke 等人所著的 *Dynamics of Young Star Clusters and Associations* 和 L. Spitzer 所著的 *Dynamical Evolution of Globular Clusters*。对星云和星际介质感兴趣的读者可以阅读 S. Kwok 所著的 *Physics and Chemistry of the Interstellar Medium*。H. Mo 等人所写的 *Galaxy Formation and Evolution* 是一本关于星系形成和演化的非常精彩的教材。对于星系动力学感兴趣的读者，可以阅读 J. Binney 和 S. Tremaine 所著的 *Galactic Dynamics*。如果对于活动星系核感兴趣，J. Frank 等人所著的 *Accretion Power in Astrophysics* 细致讲解了黑洞吸积盘理论。关于宇宙学，市面上的优秀著作很多，北京大学俞允强老师所写的《物理宇宙学讲义》和《热大爆炸宇宙学》是非常适合入门的书籍。诺奖得主 P. Peebles 的 *Principles of Physical Cosmology*，S. Dodelson 的 *Modern Cosmology*，J. Peacock 的 *Cosmological Physics*，S. Weinberg 的 *Cosmology* 等都是各具特色的优秀宇宙学教材。

第八章 太空探索

1 序言

人类总是怀有好奇心的，当冥思“我从哪里来”和“我将到哪去”的究极哲学问题时，人们总不免要抬头望一眼星空——广袤无垠的宇宙蕴含太多秘密，等待满溢求知欲的人类去探索。航天就是在这种好奇心与求知欲中发展来的——与其静坐在地面上仰望星空，何不飞到身边看看呢？

航天就是以探索宇宙为初心，并逐渐发展为利用宇宙进行资源开发与应用的科学技术手段。一般而言“航空”泛指大气层以内的飞行，而“航天”泛指大气层以外的飞行。

现在国家级别的航天组织有中国国家航天局（CNSA）、美国国家航空航天局（NASA）、俄罗斯国家航天集团（Roscosmos）、欧洲空间局（ESA）、日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）和印度空间研究组织（ISRO）等，私人企业性质的航天机构有美国埃隆·马斯克（Elon Musk）创建的太空探索技术公司（SpaceX）、英国理查德·布兰森（Richard Branson）创建的维珍银河（Virgin Galactic）、美国杰夫·贝索斯（Jeff Bezos）创建的蓝色起源（Blue Origin），以及蓝箭航天、星河动力、星际荣耀、零壹空间等一大批新兴的中国民营航天企业。

人类的航天史自 20 世纪 50 年代开始，至今不及百年，但仍是一部可歌可泣的历史长篇，其中不乏动人心弦的伟大奇迹，也有惨痛而壮烈的失败和事故。本章将从航天器、人造地球卫星、太阳系探测器与载人航天四个方面介绍航天基础知识、代表性任务与航天历史。

2 火箭及其他航天器

运载火箭是一种依靠火箭发动机提供动力、多级火箭串并联组成的航天运载工具，可以利用火箭的反作用力把各种航天器发送到地球外部空间。传统运载火箭属于一次性使用运载系统，执行完任务后，运载火箭被抛弃。但是随着猎鹰 9 号等可重复

使用火箭的出现，火箭正在向着可重复使用的方向发展，这一浪潮的兴起是必然的。

在运载火箭中，火箭发动机提供飞行动力，推进剂作为燃烧物质，除此之外，运载火箭还包括控制系统、结构系统、分离机构、电子系统、安全系统和有效载荷舱等部分。许多运载火箭都是通过弹道导弹改制而成的，它的基本技术和原理与弹道导弹相似，比如俄罗斯联盟系列火箭起源于前苏联 R-7 洲际弹道导弹，中国长征系列火箭起源于东风五号洲际弹道导弹。

发动机

火箭发动机是火箭的心脏，是火箭最核心也是最容易出现事故的部件。发动机中主要包括了燃烧过程和流动过程，燃烧过程将推进剂的化学能转变为热能，流动过程将热能转变为动能。因此火箭发动机工作过程的本质是能量转化。

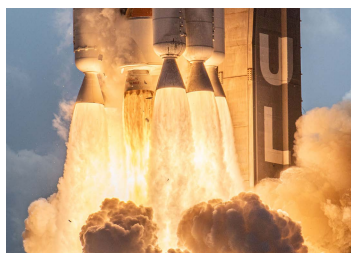
衡量火箭发动机性能的参数主要有推力、室压、总冲、比冲、推进效率、混合比等。在此主要介绍前四个参数：

推力 火箭发动机的推力是作用在发动机内外表面各种力的合力。一般与燃料种类、燃料流量、喷气速度、燃烧室压力、大气压力和喷管横截面积有关。

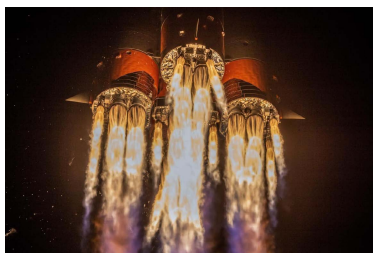
室压 室压即燃烧室压力，是衡量火箭发动机推力的重要指标。一般燃烧室压力越高，大气压力越低，推力就越高，因此一款火箭发动机在海平面推力最低，在太空中的真空推力最高。

总冲 物理学中定义作用力和作用时间的乘积为冲量。对于发动机来说，推力与工作时间之积称为发动机的总冲，在一定程度上决定火箭运力的大小。

比冲 火箭发动机在稳定工作状态下，单位质量推进剂产生的冲量称为比冲。比冲是衡量发动机性能最核心的指标之一。推进剂质量一定时，比冲越高，火箭的有效载荷就越大。



宇宙神 5 号



联盟 2.1a

图 8.1 两种火箭的尾焰

推进剂

按照推进剂不同，火箭可分为**固体火箭**、**液体火箭**和**固液混合火箭**。

固体火箭原理与古代的火药与烟花类似，一般采用高氯酸盐类、硝酸酯类、高分子聚合物等作为燃料，它结构简单、可靠性高、成本低、储存稳定，但是一旦点火不能停止，不能重新启动，也难以调节矢量方向。

液体火箭的常见燃料有**四氧化二氮-偏二甲肼 (N-U)**、**液氧-液氢 (O-H)**、**液氧-煤油 (O-K)** 等。四氧化二氮与偏二甲肼混合即可燃烧，无需设专门的点火装置，且可以常温加注后储存，但是二者均有剧毒。液氧-液氢和液氧-煤油燃料的推力可调节、能反复起动、能控制推力大小、工作时间较长，特别是液氧-液氢燃料比冲极高；但是发动机结构复杂，发射准备时间长，推进剂不宜长期储存，导致成本很高。

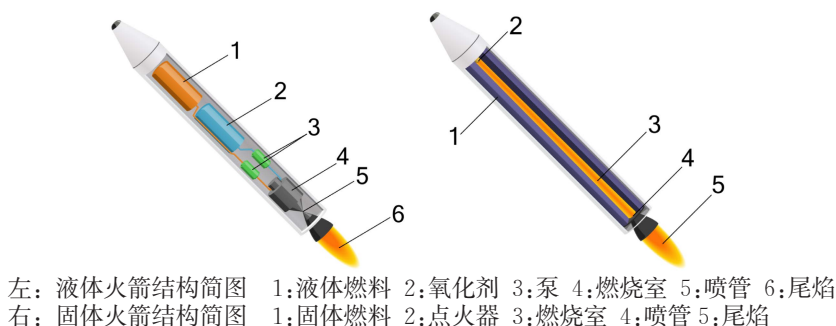


图 8.2 液体火箭与固体火箭的结构简图

除了化学燃料推进外，**电推进**这一新型推进方式逐渐兴起。顾名思义，电推进使用电能来加速工质（通常是氙或碱金属如铯、铷、锂等的蒸气）。电推进优点在于比冲非常高，通常可达几千甚至几万米每秒，可以节省携带的工质，腾出有效载荷的空间；但缺点也很明显，电推进的推力十分小，2021 年 9 月底，航天五院五〇二所联合北京航空航天大学研制的电推进发动机最大功率 86 千瓦，推力达到 1.8 牛，比冲 5160 米每秒，是目前我国功率最大、推力最高的电推进发动机。

世界知名火箭发动机部分性能参数列在表 8.1 中。

世界知名火箭简介

① **美国——土星 5 号 (Saturn V)** 土星 5 号为美国载人登月任务而生，高 110.6 米，最大直径 10.1 米，共有三级，起飞推力达到 3408 吨，LEO 运力 118 吨，TLI 运力 45 吨。美国在 1967 年至 1973 年间共发射了 13 枚土星 5 号运载火箭，全部成功。1973 年后，土星 5 号退役，成为一代传奇。

② **美国——德尔塔 IV 重型 (Delta IV Heavy)** 德尔塔 IV 型重型火箭高 71.6 米，

表 8.1 世界知名火箭发动机部分性能参数

发动机	国家	燃料	推力 (kN)		室压 (MPa)	应用火箭
			海平面 / 真空	比冲 (m/s) 海平面 / 真空		
F-1	美国	O-K	6770 / 7770	263 / 304	7	土星五号
RS-25	美国	O-H	1860 / 2279	336 / 453	20.64	航天飞机
RS-68	美国	O-H	2886 / 3308	365 / 410	10.26	德尔塔-4H
SRB	美国	固体	12 000	242	2.8	航天飞机
RD-170	俄罗斯	O-K	7259 / 7900	309 / 337	24.52	能源号
RD-275M	俄罗斯	N-U	1671 / 1832	288 / 316	16.5	质子号
YF-20	中国	N-U	731 / 816	259 / 289	7.1	长征二、三、四号
YF-77	中国	O-H	518 / 700	320 / 430	10.2	长征五号
YF-100	中国	O-K	1200 / 1340	300 / 335	18	长征五、六、七、八号

一级由三个直径 5 米的公共核心助推器组成，呈一字形直线排列。每个助推器只有一部 RS-68 发动机，其 LEO 运力即可达到 28.79 吨，GTO 运力 14.22 吨。截至 2021 年 4 月 26 日成功发射一颗美国国家侦察局间谍卫星，该型火箭已经执行了 13 次任务。除了第 1 次发射部分失败外，其余 12 次均获得了成功。目前在役。

③ 美国——宇宙神 5 号 (Atlas-V) 美国洛克希德·马丁公司研制生产的宇宙神运载火箭系列是 20 世纪 50 年代由宇宙神洲际导弹演变而来的。宇宙神 5 采用模块化设计，以达到 LEO 运力 9.8 吨到 20.5 吨的递变。比如一枚宇宙神 5-*abc* 火箭，*a* = 4 或 5 时分别表示使用 4 米或 5 米直径的整流罩；*b* = 0, 1, 2, 3, 4, 5 时表示芯级捆绑的固体助推器数量；*c* = 1 或 2 时表示半人马座上面级发动机的数量。宇宙神 5 是强迫症死敌，因其助推器不论有几枚，排布方式从来不是中心对称的。截至 2021 年 5 月 18 日成功发射一枚美军天基红外导弹预警卫星，该型火箭已经发射 87 次，其中 86 次成功，目前在役。

④ 美国——猎鹰 9 号 (Falcon 9) 及重型猎鹰 (Falcon Heavy) 猎鹰 9 号火箭是美国 SpaceX 公司研制的可回收式中型运载火箭，LEO 海上回收运力 15.6 吨，不回收运力 22.8 吨；GTO 陆地回收运力 3.5 吨，海上回收运力 5.5 吨，不回收运力 8.3 吨。研发阶段爆炸多次，最终于 2010 年 6 月 4 日完成首次发射，于 2015 年 12 月 21 日完成首次回收。目前 Block 5 构型在役，且凭借强大的重复使用技术，截至 2021 年 8 月发射次数已经突破 120 次，发射成功率和回收成功率均极高。重型猎鹰是将三枚猎鹰 9 号助推器捆绑而成，其近地轨道运载能力达 63.8 吨，地球同步轨道运载能力为 26.7 吨。2018 年 2 月 6 日，重型猎鹰携带一辆红色 2018 款特斯拉跑车首飞成功。

⑤ 欧空局——阿丽亚娜 5 号 (Ariane 5) 阿丽亚娜 5 型火箭是欧洲研制的一次性运载火箭阿丽亚娜系列火箭中的最新型号，LEO 运力 16 吨，GTO 运力 6.95 吨。它于 1996 年 6 月 4 日首次发射并失败，截至 2021 年 7 月 30 日成功发射一颗通信卫星，



① 土星五号 ② 德尔塔Ⅳ重型 ③ 宇宙神 5-411 ④ 猎鹰 9 号 ④ 重型猎鹰

图 8.3 世界知名火箭（①~④）

阿丽亚娜 5 号已经进行了 110 次发射，其中 105 次成功，目前在役。

⑥ 俄罗斯——**联盟 2 (Soyuz-2)** 联盟 2 系列火箭脱胎于前苏联 R-7 系导弹，自 1967 年就作为发射联盟号飞船的火箭而家喻户晓，目前主要任务是为国际空间站运送人员和货物，同时还进行由俄罗斯和欧洲联合组建的 Starsem 公司的商业发射。联盟号火箭系列中最大 LEO 运力 8.2 吨，SSO 运力 4.8 吨，GTO 运力 2.4 吨。目前该系列火箭已经发射一千余次，成功率为 96%。

⑦ 俄罗斯——**质子号 (Proton)** 质子号火箭从 20 世纪 60 年代中期以来一直是前苏联及俄罗斯在发射大型航天器时的主要运载工具，它是世界上运力最大的以四氧化二氮-偏二甲肼（有毒）为燃料的火箭，故又称为“毒王”。其 LEO 运力 23.7 吨，GTO 运力 6.3 吨。截至 2021 年 7 月 21 日成功发射国际空间站“科学号”实验舱，质子号已经发射 426 次，其中 378 次成功，成功率 88.7%，目前在役。

⑧ 中国——**长征系列运载火箭 (Long March)**：长征系列运载火箭是中国自行研制的航天运载工具。长征运载火箭起步于 20 世纪 60 年代，1970 年 4 月 24 日“长征一号”运载火箭首次发射“东方红一号”卫星成功。

长征火箭已经拥有退役、现役共计 20 种型号。其中长征一号、长征二号、长征二号 E、长征三号、长征四号甲 5 个型号已退役；长征二号丙、长征二号丁、长征二号 F、长征三号甲、长征三号乙、长征三号丙、长征四号乙、长征四号丙、长征五号、长征五号 B、长征六号、长征七号、长征七号甲、长征八号和长征十一号 15 个型号在役。另有长征六号甲、长征六号 X、长征八号 R、长征十一号甲、921 新一代载人运载火箭、长征九号 6 个型号在研。

其中，长征一号到四号为老一代火箭系列，主要采用有毒的四氧化二氮-偏二甲

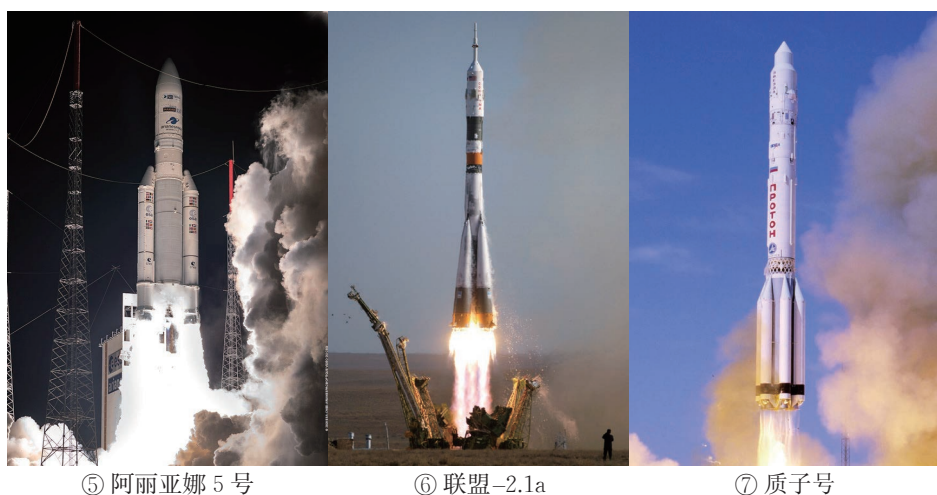


图 8.4 世界知名火箭（⑤~⑦）

肼燃料，其中长征二号 F 的 LEO 运力最高，为 8.8 吨，主要执行我国神舟飞船发射任务，被誉为“神箭”；长征三号乙 GTO 运力最高，为 5.5 吨。

长征五号到九号以及长征十一号为新一代火箭系列，主要采取无毒无污染的液氧-煤油及液氧-液氢为燃料。其中长征五号 B 的 LEO 运力最高，为 25 吨；长征五号 GTO 运力最高，为 14 吨。

我国长征系列运载火箭体系完善，各种不同型号的火箭能够涵盖各种不同发射轨道，运力满足各种载荷要求，以胜任不同的发射任务。现役火箭成功率多保持在 95% 以上，并且部分型号保持有 100% 成功的记录。

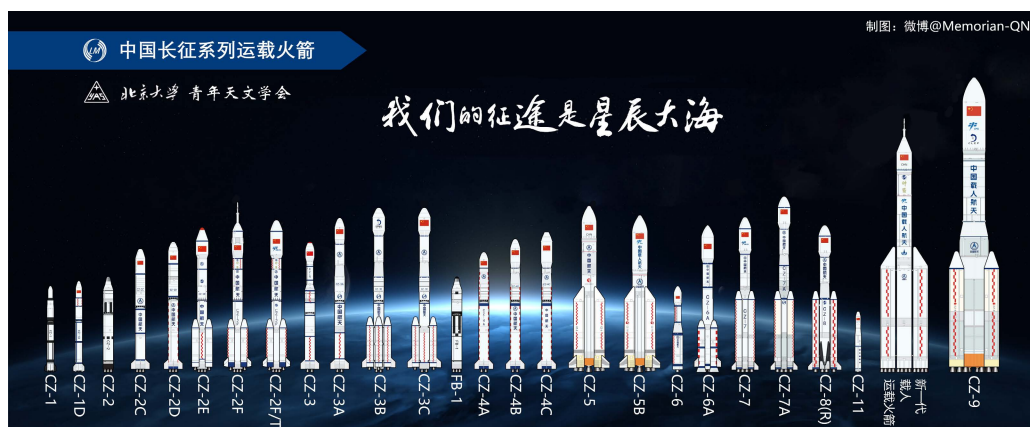


图 8.5 中国长征系列运载火箭图谱

③ 人造地球卫星

根据 UCS Satellite Database 的数据，截至 2021 年 7 月 31 日，地球轨道上有 4084 颗正在工作的卫星，我们生活的方方面面早已经离不开这些卫星了。

人造地球卫星的轨道

近地轨道 (LEO) 是指航天器距离地面高度较低的轨道。近地轨道没有公认的定义，一般轨道高度在 2000 千米以下的近圆形轨道都可以称之为近地轨道。

中地球轨道 (MEO) 处于近地轨道与地球静止轨道之间的轨道，GPS 卫星及部分北斗卫星均运行于此轨道上。

太阳同步轨道 (SSO) 如果卫星轨道平面绕地球自转轴的旋转方向和角速度与地球绕太阳公转的方向和平均角速度相同，则这种卫星轨道称为太阳同步轨道。当卫星每次飞越某地上空时，太阳都是从同一角度照射该地。大部分陆地卫星、气象卫星和海洋卫星等对地观测卫星都运行在太阳同步轨道上，这样有利于全球观测，且每天有较好的光照条件，可使拍摄的地面目标图像最好。

地球静止轨道 (GEO) 地球静止轨道位于地球赤道上空离地面 35786 千米、且轨道倾角为 0 处。卫星在这一轨道运行时，由于它绕地球运行的角速度与地球自转的角速度相同，从地面上看去它好像是静止的，所以称为地球静止轨道。中国大部分通信卫星、部分风云气象卫星和部分高分系列对地观测卫星都运行在地球静止轨道。此外，发射阶段从近地轨道转移到地球静止轨道的路线称为**地球同步转移轨道 (GTO)**。

闪电轨道 (Molniya) 对于在高纬度的国家，处于赤道上空的地球静止轨道的卫星方位角过低，通信和观测受限，因此常采取闪电轨道。它为倾角为 63.4° 的高椭圆轨道，其近心点幅角为 -90° ，轨道周期为半个恒星日。在高椭圆轨道上的卫星在远地点附近速度较慢，因此在远地点附近停留的时间较长，使用三颗及以上卫星可以在高纬度达到类似地球静止轨道的效果。

此外，还有**地月转移轨道 (TLI)**、**地火转移轨道 (TMI)** 等轨道。

早期人造地球卫星

人造地球卫星是美苏太空争霸的产物，1957 年 10 月 4 日，苏联在拜科努尔航天中心发射了人类历史上第一颗人造卫星：**斯普特尼克 1 号 (Спутник)**。它是一个直径 58.5 厘米的球体，重 83.6 千克。科罗廖夫曾说：地球是球形，所以第一颗卫星也必须是球形。它的唯一功能便是向地面不断发送“嘟嘟”的无线电信号，到电池耗尽时持续了 22 天。最终它于 1958 年 1 月 4 日再入大气层烧毁。

此后美国、法国和日本接连发射了三枚卫星，美国的**探险者 1 号 (Explorer 1)** 重

13.97 千克，早已再入大气层烧毁。法国的**阿斯特里克斯号**（*Astérix*）重 41.7 千克，只工作两天就因故障而终止工作。日本的**大隅号**仅重 9.4 千克，发射一天后即失去联系。

新中国在 1970 年 4 月 24 日成功发射第一颗人造卫星**东方红一号**，它重 173 千克，进行了轨道测控和《东方红》乐曲的播送，并在轨工作了 28 天。东方红一号卫星目前仍在轨道上运行，在合适的条件下我们依旧可以观测到东方红一号过境的光点。东方红一号发射成功，开创了中国航天史的新纪元，使中国成为继苏、美、法、日之后世界上第五个独立研制并发射人造地球卫星的国家。

天文望远镜卫星

著名的**哈勃空间望远镜**（Hubble Space Telescope, HST）以美国天文学家爱德温·哈勃（Edwin Hubble）命名，重 11 吨，于 1990 年 4 月 24 日由美国“发现号”航天飞机成功发射。作为一颗近紫外到近红外光学望远镜，它成功弥补了地面观测的不足，有力推动了人们对于宇宙的更深层次认知，是天文史上最重要的器材之一。



图 8.6 哈勃空间望远镜

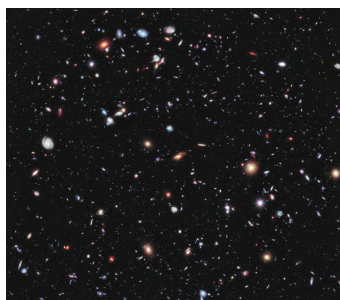


图 8.7 哈勃极深场

第七章中绝大多数深空天体照片均由哈勃空间望远镜拍摄。而哈勃另一项重要的工作是拍摄了名为**哈勃极深场**（Hubble Extreme Deep Field, XDF）的图像，在经过总计超过 200 万秒的曝光后，拍摄到迄今为止宇宙最深的照片。它只占整个天空的 3000 万分之一，但却包含了大约 5500 个星系。其中一些星系非常遥远，宇宙有 137 亿年的历史，而 XDF 拍摄到了最早 132 亿年前的星系。

哈勃空间望远镜专注于近红外、可见光到近紫外的光学波段，除此之外 NASA 还拥有**康普顿 γ 射线天文台**（Compton Gamma Ray Observatory, CGRO）、**钱德拉 X 射线天文台**（Chandra X-ray Observatory, CXO）和专注于红外波段的**斯皮策空间望远镜**（Spitzer Space Telescope, SST），这四颗卫星各司其职，共同组成了**美国大型轨道天文台计划**（Great Observatories）。

遗憾的是，随着航天飞机退役，人们再也没有维修哈勃的机会了。老骥伏枥的哈勃仍在苟延残喘着，不时有因故障停运的新闻报道，不知哪天它会寿终正寝。NASA 方面

一直在准备哈勃的替代品——詹姆斯·韦伯空间望远镜（James Webb Space Telescope, JWST）。它原本计划 2014 年发射，但因地面测试受一系列技术问题困扰，使发射时间一度推迟到 2021 年底，如今已成为航天界知名鸽王之一。

我国预计在 2024 年发射巡天号光学舱，与中国空间站共轨飞行，是中国空间站的重要组成部分。它有着媲美哈勃的分辨率，却拥有超过哈勃 300 倍的视场，这意味着哈勃花费一年所获取的数据，巡天号一天就可以获取完毕。届时，我国巡天号光学舱将会成为世界最先进太空望远镜之一。

卫星星座

卫星并非个个千差万别，有时需要发射一组性能相近甚至相同的卫星，组合起来才能发挥出全部的效用，这就是人造卫星星座。

知名的卫星星座包括 GPS、CALILEO、GLONASS 和我国的北斗等导航卫星星座，以及我国的高分对地观测卫星星座、风云系列气象卫星星座等。

美国的铱星星座（Iridium satellite）在全球天文爱好者中有着极高的知名度。1997 到 1998 年，美国铱星公司发射了 66 颗用于手机全球通讯的人造地球卫星，这些卫星都有三块表面极其光亮的独特铝天线，像镜子一样将阳光反射到地面。因此在合适的时间与角度，观测者可以看到铱星很快变亮，最亮时甚至可以达到 -9.5 等，持续几秒钟后又很快变暗，这种现象叫做铱闪（Iridium flares）。遗憾的是，随着 2019 年 12 月 27 日最后一颗铱星再入大气层烧毁，这一独特的人造天文现象永远尘封于天文观测历史中，也永远定格在曾亲眼见过铱闪的航天爱好者的双眸中。

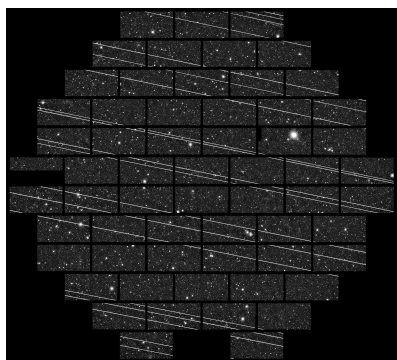


图 8.8 马斯克的“杰作”

最近几年，SpaceX 公司的星链（Starlink）通信卫星星座饱受天文学界诟病，虽然在地球观测到卫星过境是一件令人愉悦的事情，但马斯克发射的星链卫星实在是太多了——他竟然计划将 42000 颗星链卫星送入近地轨道。截至 2021 年 6 月底，马斯克使用猎鹰 9 号运载火箭，以一箭 60 星的极高效率向天空发射了 1740 颗、每颗 260 千克重的星链卫星，并且已经在一定程度上影响了天文观测的进行。2019 年 11 月 20 日，美洲 Cerro Tololo 天文台（CTIO）的 Blanco 4 米望远镜进行观测，拍摄

到的 19 条白线正是星链卫星星座搞的鬼。马斯克声称要对接下来的星链卫星做“暗化”处理，但好像并没有太大作用。

■ 过境卫星观测

相关内容请移步第五章第4节。

④ 太阳系探测器

太阳系是人类如今依靠化学动力能够探测到宇宙的唯一零光片羽。相比在地面使用望远镜远距离观测，发射探测器对太阳系星体近距离环绕探测甚至着陆探测是更加直观的手段，可以拍摄更加清晰的图像，获取最直接的科学数据。在此选择了具有意义的几个任务对人类的太阳系探测进行介绍。

■ 旅行者1号及旅行者2号

旅行者1号（*Voyager 1*）和旅行者2号（*Voyager 2*）是NASA研制的两艘无人外太阳系空间探测器，分别重825.5千克、721.9千克，带有数量可观的科研仪器及相机。由于外太阳系光照不足，两探测器均选择使用钷-238核电池提供能源。

旅行者2号首先于1977年8月20日发射，是有史以来运作时间最久的空间探测器。恰逢176年一遇的行星几何排列关系，它能够一次性造访四颗气态巨行星及其卫星：发射两年后飞掠木星，四年后拜访土星，九年后造访天王星，十二年后到达旅途的最后一站海王星，然后借助各大行星的引力助推飞向遥远的星际空间。截至2021年，探访过天王星与海王星的只有旅行者2号这一艘人类探测器。第四章中天王星和海王星的照片均由旅行者2号拍摄。

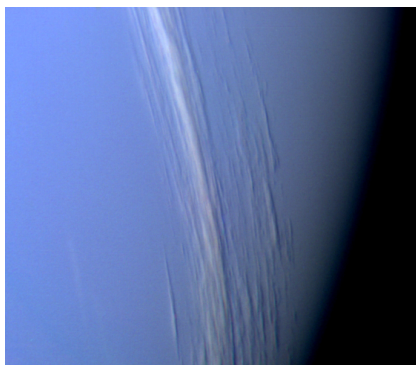


图 8.9 海王星上的卷云

旅行者1号于1977年9月5日发射，由于轨道规划不同，它于同年12月19日超越了旅行者2号，并率先到达木星、土星开展探测。为了探测土卫六（泰坦），旅行者1号放弃了天王星与海王星，与旅行者2号分道扬镳。

两艘探测器如今仍在运行，2012年6月17日，NASA公布经过35年的飞行，旅行者1号已经离开太阳系，成为首个离开太阳系的人造物体。旅行者2号也已于2018年11月5日穿越日球层顶离开太阳系。受限于核燃料衰变，两艘探



图 8.10 旅行者1号拍摄的木星大红斑

测器部分科研设备已永久关闭，仅保留低能耗的低能带电粒子系统（LECP）等设备，并以 160 B/s 的速度保持与地球通讯。预计 2025 年两艘航天器将会因功率过低而永久失联，并将永远向无垠的宇宙飞去。

■ 伽利略号木星探测器



图 8.11 在地面测试阶段的伽利略号

伽利略号（*Galileo*）是美国宇航局一艘无人航天器，专门用作研究木星及其卫星。是首个围绕木星公转以探测木星卫星及大气的探测器。它于 1989 年 10 月 18 日由亚特兰蒂斯号航天飞机运送升空，并于 1995 年 12 月 7 日接近木星。

在伽利略号到达木星之前，人们一共发现了 16 颗木星的卫星。伽利略号到达后又发现了多颗卫星。它发现木卫一上的火山活跃程度比地球上的火山高出 100 倍，还发现木卫三居然和地球一样有整体磁场。此外，基于伽利略号观测信息科学家推测木卫二地表下可能存在液体海洋，并可能存在生命。伽利略号还释放了一枚木星大气探测器，带有降落伞和隔热罩的这枚探测器坠入木星的深渊，人类第一次触摸到了木星稠密的大气，并获得了宝贵的数据。

伽利略号绕木星 34 圈，发回包括 1.4 万张照片在内的 29 GB 数据。伽利略号发射前并未做灭菌处理，为了避免伽利略号上的细菌及核燃料污染可能存在生命的卫星，2003 年 9 月 21 日，伽利略号在地面引导下撞向陪伴了 8 年的木星，化作木星大气中的一缕风。

■ 卡西尼-惠更斯号土星探测器

卡西尼-惠更斯号（*Cassini-Huygens*）是前往土星系统的一架旗舰级空间探测器，由美国宇航局、欧洲空间局和意大利航天局合作进行。整个任务分为环绕土星的卡西尼号与在土星最大卫星土卫六着陆的惠更斯号两部分。探测器于 1997 年 10 月 15 日一同发射升空，并于 2004 年 7 月初抵达土星轨道。

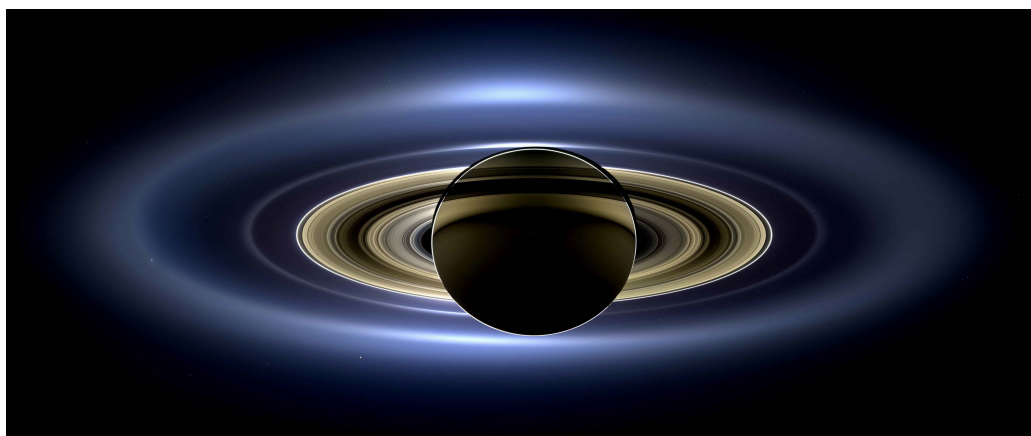


图 8.12 卡西尼号经典摄影作品：*The Day the Earth Smiled*

卡西尼号环绕土星飞行并研究它的大气、土星环及其卫星。飞跃土卫二时，卡西尼号在喷流中发现了构成生命的化学物质和丰富的常见气体，例如水蒸气、二氧化碳、一氧化碳等等。惠更斯号重 319 千克，前部有一个像贝壳的防热盾，配备有三个降落伞，于 2004 年 11 月 27 日成功着陆土卫六，存活 90 分钟，成功拍摄到了土卫六的地貌。

卡西尼号共环绕土星 294 周，发回包括 45 万张照片在内的 635 GB 数据。因与伽利略号相同的原因，2017 年 9 月 15 日卡西尼号撞向土星，身躯因高温而燃烧、炸裂，与土星融为一体。



图 8.13 惠更斯号拍摄的土卫六地表

好奇号火星车及毅力号火星车

好奇号火星车 (*Curiosity*) 于 2011 年 11 月 26 日发射，2012 年 8 月 6 日成功登陆火星盖尔陨石坑。它是世界上第一辆核动力火星车，其使命是调查火星气候与地质，探寻火星上可能的生命。好奇号长 3.0 米，宽 2.8 米，高 2.1 米，重 899 千克。2019 年 10 月，美国航天局表示，好奇号火星车在火星盖尔陨石坑内发现了富含矿物盐的沉积物，表明坑内曾有盐水湖，显示出气候波动使火星环境从曾经的温润、潮湿演化为如今寒冷、干燥的气候。

毅力号火星车 (*Perseverance*) 的设计参照了好奇号，重量达到了 1025 千克，并携带了更加先进的科研仪器。它于 2020 年 7 月 30 日发射，并于 2021 年 2 月 18 日在火星杰泽罗陨石坑安全着陆。它还携带了一架名为机智号 (*Ingenuity*) 的小型火星直升机，重 1.8 千克，2021 年 4 月 19 日成功在火星稀薄的大气中起飞，为火星车探路。



图 8.14 好奇号火星车经典角度的自拍



图 8.15 机智号火星直升机

中国探月工程——嫦娥系列探测器

2004 年，中国正式开展月球探测工程，并命名为“嫦娥工程”。嫦娥工程分为“无人月球探测”“载人登月”和“建立月球基地”三个阶段。而其中的无人月球探测又分为三期：一期绕月，二期落月，三期采样返回。目前我国已经成功完成了无人月球探测的第三期目标。



图 8.16 嫦娥二号拍摄的图塔蒂斯小行星间隔成像照片

嫦娥一号和嫦娥二号的目标是绕月，分别于 2007 年 10 月 24 日和 2010 年 10 月 1 日发射，二者获取了全月球影像图、月表部分化学元素分布等一批科学研究成果。嫦娥一号最终于 2009 年 3 月 1 日受控撞击月球。嫦娥二号任务成功后主动离开月球进行深空探测，于 2011 年 8 月 25 日进入拉格朗日 L2 点环绕轨道，并于 2012 年 12 月 13 日接近 4179 号小行星图塔蒂斯（Toutatis）并捕获小行星影像，完成了 4179 号小行星国际首次近距离

的光学探测。

嫦娥三号和嫦娥四号的目标是落月，分别于 2013 年 12 月 2 日和 2018 年 12 月 8 日发射，二者均由着陆器及巡视器组成，巡视器分别名为玉兔号和玉兔二号。两任务均取得了成功。但是玉兔号进入第二次月夜休眠前，受复杂月面环境的影响，月球车的控制机构出现异常，唤醒后无法移动，玉兔号的月表行驶里程定格在 114.3 米。嫦娥四号是人类第一个着陆月球背面的探测器，实现了人类首次月球背面软着陆和巡

视勘察，意义重大。携带的玉兔二号月球车汲取玉兔号故障的经验，截至 2021 年 7 月行驶里程已经突破 700 米，并将继续坚定地走下去。此外，**鹊桥号**于 2018 年 5 月 21 日发射，是嫦娥四号月球探测器的中继卫星。它工作于地月拉格朗日 L2 点的 Halo 轨道，成为世界首颗运行在地月 L2 点 Halo 轨道的卫星，负责为月背着陆的嫦娥四号进行通信中继。

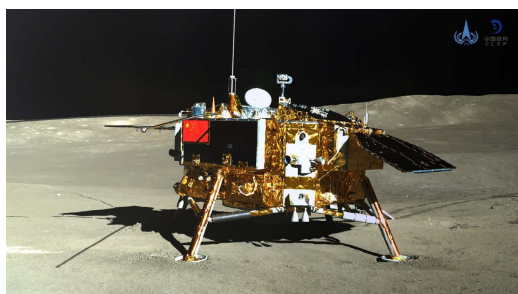


图 8.17 嫦娥四号



图 8.18 玉兔二号月球车的影子

嫦娥五号再入返回飞行试验器（嫦娥五号 T1）于 2014 年 10 月 24 日发射，成功验证了日后嫦娥五号以第二宇宙速度再入返回的技术验证任务。

嫦娥五号和**嫦娥六号**的目标是取样返回，前者于 2020 年 11 月 24 日发射，是中国首个实施无人月面取样返回的月球探测器，也是当前中国航天最复杂、难度最大的任务之一。12 月 1 日，嫦娥五号在月球正面预选着陆区着陆，采集 1731 克月壤样本后成功起飞，并成功实施全球首次月球轨道自动交会对接。12 月 17 日凌晨，嫦娥五号返回器携带月球样品成功着陆地球，为未来我国开展月球和行星探测奠定了坚实基础。目前嫦娥五号轨道器正在日地拉格朗日 L1 点探测，燃料余量充足，正在评估下一步的附加探测任务。后续我国将发射嫦娥六号，预计前往月球背面艾特肯盆地取样返回。

嫦娥七号与**嫦娥八号**则将为 2030 年的中俄联合月球科考站进行前期探测与技术验证。

■ 天问一号火星探测器

天问一号于 2020 年 7 月 23 日在文昌航天发射场由长征五号遥四运载火箭发射升空，是我国首次火星探测任务，一次性实现了火星环绕、着陆、巡视的目标。天问一号由轨道器及载有祝融号火星车的着陆器组成，总重 5 吨左右，其中祝融号火星车重 240 千克。

天问一号于 2021 年 2 月到达火星附近，被火星捕获。2021 年 5 月 15 日 7 时 18 分，天问一号着陆巡视器成功着陆于火星乌托邦平原南部预选着陆区，中国首次火星

探测任务着陆火星取得圆满成功。截至 2021 年 8 月底，祝融号火星车行驶里程已经突破 1000 米。

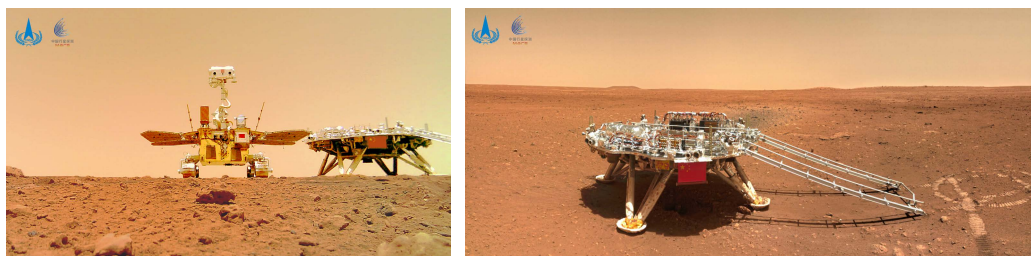


图 8.19 祝融号传回的火星影像

中国航天一次次向世界展示了稳扎稳打的研发风格、脑洞巨大的创新能力和心怀宇宙的探索精神，让我们一同期待中国航天接下来的小行星取样返回任务“郑和号”、木星系探测任务、火星取样返回任务甚至载人登月任务吧！

5 载人航天

“地球是人类的摇篮，但是人类不能永远生活在摇篮里。”前苏联现代航天学和火箭理论的奠基人齐奥尔科夫斯基如是说。载人航天是人类走出地球摇篮的第一步。不同于发射一般的卫星，载人航天要求航天器有着完备的生命保障系统，确保航天员可以安全进入太空并返回地面。本节将按照时间顺序介绍世界载人航天发展史、重要载人航天任务及重要载人航天器。

早期载人航天

人类的航空航天事业是在美国、前苏联两大超级大国“冷战”白热化阶段产生并发展的。

在早期的发展过程中，前苏联当局拥有谢尔盖·科罗廖夫（Сергей Королёв）等一批航天奇才，前苏联早期的载人航天事业比美国更加顺风顺水。

在发射成功率不高的时代，敢于上天的都是勇士。1961 年 4 月 12 日，**东方 1 号**（Восток-1）在拜科努尔航天发射场升空，前苏联宇航员尤里·加加林（Юрий Гагарин）成为第一名进入太空的人类，在总时长 1 小时 48 分钟的任务中，他成功进入低地球轨道，绕地球飞行了一整圈。加加林名垂青史，拉开了载人航天时代的大幕。



图 8.20 世界第一次载人飞行任务，尤里·加加林在“东方一号”舱内的照片。

仅不到一个月后的同年5月5日，美国在错失“第一个进入太空国家”称号后，名为“自由7号”的水星飞船（Mercury）将阿伦·谢泼德（Alan Shepard）匆匆送入亚轨道，他的飞行全程仅有15分钟，完全不能与苏联的轨道级任务相提并论，赫鲁晓夫因此讥讽这是“跳蚤的一跃”。虽然如此，谢泼德依旧被认定为美国进入太空第一人。

后来，美苏两国在冷战中不断对自身技术进行快速迭代，前苏联由“东方号”飞船发展出“上升号”飞船（Восход），美国由“水星”飞船拓展到“双子座”飞船（Gemini），都具备了同一艘航天器搭载多人、航行多天的能力。

为了进一步增强载人航天能力，并作为前苏联载人登月计划中的地月往返工具，1967年4月23日，前苏联第一艘载人联盟飞船（Союз）发射升空。该飞船为实用的三舱段构型，即返回舱、轨道舱与推进舱，最多可承载3人。遗憾的是，联盟1号飞船在返回时未能成功打开主降落伞，返回舱以约140 km/h的速度撞向地面，宇航员科马洛夫（Комаров）成为第一位为航天事业牺牲的人类。

此后，前苏联不断优化、改进联盟飞船，时至今日已经衍生出十余种不同构型，截至2021年4月9日联盟MS-18飞船成功发射时，已经有146艘联盟飞船翱翔于宇宙之中，是发射次数最多的载人航天器，成为世界公认的最安全、最具成本效益的载人航天飞行器之一，国际空间站的大量人员天地往返任务都由“联盟”飞船承担。



图 8.21 美国第一次载人航天任务，阿伦·谢泼德升空瞬间。

美国——阿波罗登月计划（Apollo）

若评选人类获得过最伟大的成就，阿波罗登月必占一席。其科学意义与政治意义迄今为止未被超越。

随着苏联接连获得“成功发射第一颗人造卫星”“加加林成为人类进入太空第一人”等耀眼成就，美国人民深感太空技术落后的恐惧，急需一种能展现空间技术实力的尖端成就反超苏联。1962年9月12日，美国前总统肯尼迪在赖斯大学发表了《我们选择登月》（*We Choose to Go to the Moon*）的知名演讲，向全球立了一个“10年内将人类送上月球”的巨大flag。而实际上，美国仅用时7年便完成了这一壮举。

1961年6月，肯尼迪会见赫鲁晓夫，提议合作登月，但赫鲁晓夫没有接受。1963年9月20日，肯尼迪在联合国大会提出协作探索月球。同年肯尼迪遇刺后，协作登月任务构想作废，继任者约翰逊总统大力支持美国自主登月。

美国投入了巨量资金进行航天科技研究，其技术迭代速度之快令人咂舌，从1958年1月31日美国第一颗人造地球卫星发射成功，到1969年7月20日美国阿姆斯特朗踏上月球，竟然只有不到12年的时间。这期间，财大气粗的美国为载人登月进行

了多方面的准备工作：包括发射 12 艘绕月寻找着陆点的环绕器，5 艘着陆月球拍摄月表照片的着陆器，以及 10 艘“双子座号飞船”各载 2 名宇航员进行对接和舱外活动等训练。

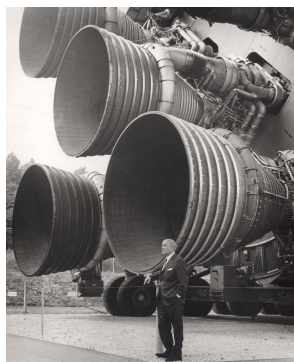


图 8.22 冯布劳恩（Wernher von Braun）与土星五号巨大的 F1 发动机合影

AS-204 任务是阿波罗计划第一次载人任务，原计划 1967 年 2 月 21 日发射，3 名宇航员将在地球轨道停留 14 天进行测试。遗憾的是，1 月 27 日的模拟演习中飞船在发射台起火，宇航员加斯·格里森（Gus Grissom）、爱德华·怀特（Edward White）和罗杰·查菲（Roger Chaffee）在大火中身亡。为了纪念他们，美国将本次任务称为**阿波罗 1 号**。这一噩耗打断了美国宇航局的任务规划，随即暂停阿波罗飞船的载人测试，转为使用阿波罗 4 号到 6 号进行无人测试（并无阿波罗 2 号与 3 号），待胸有成竹后再使用阿波罗 7 号到 10 号进行载人测试。这些任务均获得了成功。

阿波罗飞船由指令与服务舱、登月舱两大部分组成，由史诗级的土星 5 号运载火箭发射（见第 174 页），而后转移到月球轨道。其登月流程可大致描述为：一名宇航员留守指令与服务舱，绕月等待；两名宇航员进入登月舱后分离，下降并着陆月球。在月表研究结束后，登月舱的上升级起飞，与指令与服务舱对接，然后抛弃上升级，指令与服务舱点火返回地球。

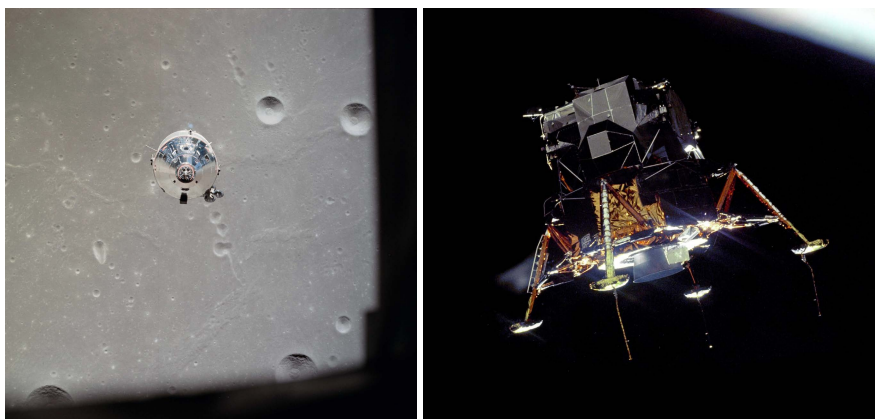


图 8.23 阿波罗 11 号指令与服务舱和登月舱分离时两舱互拍照片

1969 年 7 月 16 日，土星 5 号运载火箭载着阿波罗 11 号飞船从美国卡纳维拉尔角肯尼迪航天中心点火升空，美国宇航员**尼尔·阿姆斯特朗**（Neil Armstrong）、**巴兹·奥尔德林**（Buzz Aldrin）、**迈克尔·柯林斯**（Michael Collins）驾驶着阿波罗 11 号飞船跨过 38 万公里，开启了人类首次登月的太空征程。休斯顿时间 7 月 20 日 17:44，

两器分离，名为“鹰号”的登月舱开始减速下降。在着陆前 7 分钟，飞船发出了 1202 程序警报，阿姆斯特朗和奥尔德林略显惊慌，因为他们在模拟中从未见过这个警报，任务控制中心迅速决断，认为这一警报源于阿波罗制导计算机“高达 4KB”的内存溢出了，重启后可以正常着陆；直到着陆前 304 米时，1202 警报又响了几次，为任务增添了不少紧张氛围。在约 182 米高时，阿姆斯特朗注意到飞船将会自动落在一片危险的陨石坑中，于是他当机立断转为手动控制，决定飞越过这片崎岖地区，寻找更平坦的地方降落。在此过程中，登月舱的低燃料警告灯亮起，提示燃料仅剩余 5%。在距月面 30 米时，推进剂只够维持 90 秒。20:17:43，登月舱有惊无险地平稳触地，成功关闭引擎。此后，他们为出舱活动进行各项准备工作。

02:56:15，着陆六个半小时后，阿姆斯特朗将他的左脚踏上松软的月球表面，说出了那句永载史册的话：“这是我个人的一小步，却是人类的一大步。”而后他与奥尔德林在月表活动了约 135 分钟，收集了 21.55 千克月岩样本带回地球，并在月表部署了测量月震的被动地震实验仪，还有用于地月激光测距实验的反射器阵列，这一反射器时至今日依旧可以使用。出舱活动完成后，二人回到登月舱内美美地睡了一觉，被地面叫醒后上升段点火升空，与指令与服务舱对接会合。美中不足的是，美国国旗插得离登月舱太近了，被上升发动机的高速气流不幸吹倒。

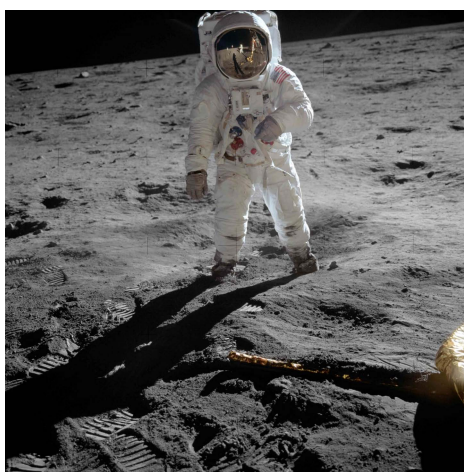


图 8.24 尼尔·阿姆斯特朗拍摄的巴兹·奥尔德林在月球上的照片

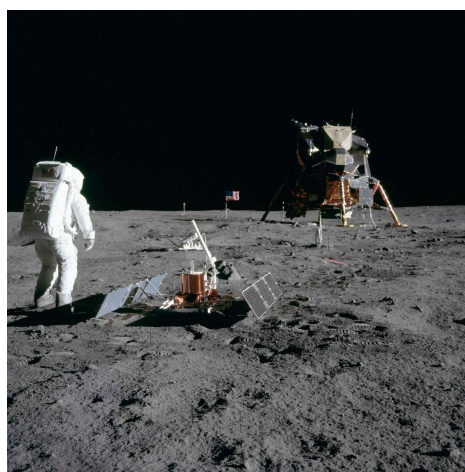


图 8.25 阿姆斯特朗使用哈苏相机拍摄的奥尔德林、被动地震实验仪和登月舱

此后美国又进行了阿波罗 12 到 17 号任务，除了阿波罗 13 号外均获得成功。阿波罗 13 号成功发射后，距地球约 33 万公里时突然发生未知的爆炸，宇航员斯威格特（Swigert）在 26 秒后向地面汇报：“休斯顿，我们有麻烦了（Houston, we have a problem）”，然后他们发现指令与服务舱电压迅速下降。地面航天中心内各路专家云

集，群策群力，八仙过海，各显神通，认为他们可以绕月一圈后正常返回地球。三名宇航员也自食其力，诚然，电源、水资源、食物与空气都是不足的，三人度过了寒冷、饥饿的三天。最终凭借他们的顽强毅力成功溅落在南太平洋上，事故也定性为服务舱燃料电池的氧气罐发生了短路导致爆炸。这九死一生的太空营救活动被赞誉为“最成功的失败”，有不少纪录片与电影重现了当年惊险的营救历程，感兴趣的读者可自行搜索欣赏。

各次阿波罗登月任务大同小异，收集的月壤一次比一次多。其中阿波罗 15 到 17 号还各带了一辆小型月球车，大大增加了宇航员的月表移动速度。后续的阿波罗 18 到 20 号因为预算缩减而被取消。

值得一提的是，阿波罗任务中登月成功的宇航员在返回地球后，由于突如其来的巨大名誉以及登月带来的超感官心理冲击对他们造成了不同程度的影响。阿姆斯特朗成功登月后，曾发出过“到底要多久，大家才不把我当作一名宇航员看？”的感慨；阿波罗 14 号宇航员艾德加·米切尔（Edgar Mitchell）回来后专注于通灵学，并创立了研究超自然现象的“意念科学研究会”（Institute of Noetic Sciences）；阿波罗 15 号宇航员詹姆斯·艾尔文（James Irwin）返回后创立了名为“高飞”（High Flight）的宗教组织，1973 年起，他数次率领团队去土耳其亚拉拉特山寻找诺亚方舟的残骸，未果，寻病终。

美国阿波罗登月一直经受各方质疑，指称当年 NASA 伪造登月事件是为了赢得与前苏联的太空竞赛。面对各种流言，NASA 均可以给出合理的解答，在此不再赘述。中国嫦娥一号、嫦娥二号曾清晰地拍摄到阿波罗各次任务遗留的登月舱、月球车与车辙等遗迹。在 2018 年，中国还利用云南天文台 1.2 米望远镜激光测距系统探测到阿波罗 15 号的月面反射器返回的激光脉冲信号，成功实现月球激光测距。

诚然，阿波罗计划极其消耗资金，截至 1973 年其总投资为 254 亿美元，相当于 2021 年的 1669 亿美元。但是，阿波罗计划也在一定程度上催生了一系列新技术的发展、成熟与普及，比如集成电路、水资源再生技术、灭火毯甚至无线吸尘器等。

美国——太空运输系统即航天飞机

美国成功登月后，登月使用的一次性飞船与火箭使美国意识到发展可重复使用航天器的必要性。1972 年 1 月，美国正式把研制**太空运输系统**（Space Transportation System, STS）列入计划，确定了航天飞机的设计方案。

航天飞机又名**太空梭**（Space Shuttle），1977 年 2 月，NASA 研制出第一架名为**企业号**（Enterprise）的航天飞机，由波音 747 飞机背负进行了机载试验。企业号仅承担了各项地面试验试飞，从未发射入轨。此后美国又制造了**哥伦比亚号**（Columbia）、**挑战者号**（Challenger）、**发现号**（Discovery）、**亚特兰蒂斯号**（Atlantis）与**奋进号**

(*Endeavour*)。每艘航天飞机均可乘坐 7 人，并且拥有一个巨大的货舱来装载卫星或国际空间站组件。

自 1981 年 4 月 12 日哥伦比亚号 STS-1 任务首飞，至 2011 年 7 月 8 日亚特兰蒂斯号 STS-135 任务谢幕，五架航天飞机一共执行了 135 次任务，其中 6 次任务参与哈勃太空望远镜发射与整修，10 次任务与前苏联和平号空间站相会或对接，37 次任务参与国际空间站组装及人员运送，剩余的任务则进行科学研究或进行卫星部署，比如著名的哈勃太空望远镜、伽利略木星探测器和钱德拉 X 射线天文台均是通过航天飞机的巨大货舱部署的。

135 次任务中，有两次任务更广为人知，而其结局是悲惨的。1986 年 1 月 28 日，挑战者号航天飞机执行 STS-51-L 任务，其右侧固体火箭助推器（SRB）的 O 型环密封圈失效，毗邻的外部燃料舱在泄漏火焰的高温烧灼下结构瓦解，使高速飞行中的航天飞机在空气阻力的作用下于发射后的第 73 秒解体，机上 7 名航天员全部罹难。2003 年 2 月 1 日，哥伦比亚号航天飞机执行 STS-107 任务，起飞 82 秒后一片隔热泡沫脱落砸伤了机翼，虽然入轨成功并且完美地执行了预定任务，但是重返大气层时高压气体窜入机体内部，在得克萨斯州上空爆炸解体，机上 7 名航天员全部罹难。机上还载有中国学生设计的“蚕在太空吐丝结茧”实验装置，也一并焚毁于天际。



图 8.26 哥伦比亚号 STS-1 任务首秀

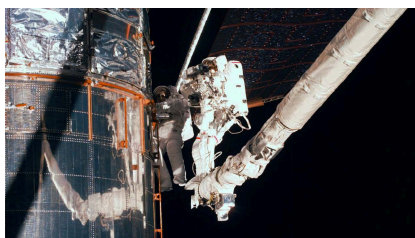


图 8.27 STS-82 任务宇航员站在机械臂上维修哈勃太空望远镜

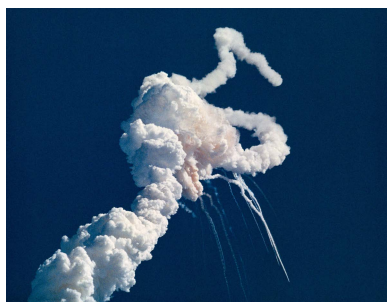


图 8.28 挑战者号航天飞机发射阶段爆炸



图 8.29 哥伦比亚号航天飞机再入大气层时解体

设计航天飞机飞机的初衷是为了重复使用，降低成本。然而事实与理想相违。单架航天飞机造价约 30 亿美元（以奋进号为标准），最初 NASA 认为每架航天飞机都可以重复使用 100 次以上，每次任务平摊下来的成本低于 3000 万美元。事实上，5 架航天飞机共计仅进行 135 次飞行，以每架飞机平均飞行 27 次计算，单次飞行的成本超过 1 亿美元。当然这还没有算上维护和检修的成本。

2010 年国际空间站接近建成，航天飞机在今后将无用武之地，加上过高的运营成本 and 过低的安全系数，美国中止了这一计划，保留下来的四架航天飞机悉数退役，现展示于美国各大博物馆中，叙说着它们曾经辉煌的历史。

国际空间站（ISS）

国际空间站（International Space Station, ISS）家喻户晓，是有史以来人类向太空发射过最大最重的物体。它已超期服役多年，却依旧在书写着人类历史；它站在人类科技的巅峰，也立在政治的风口浪尖之上。

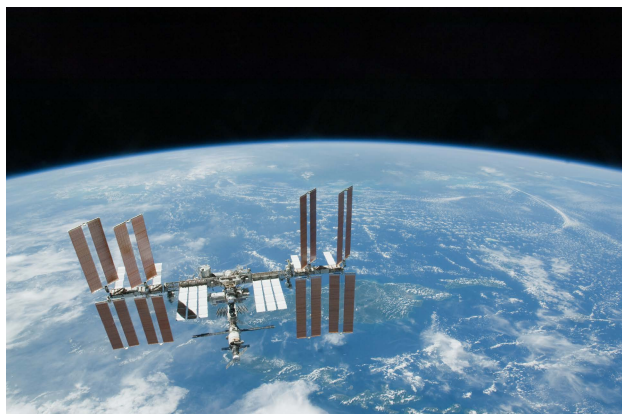


图 8.30 国际空间站

随着 1991 年苏联解体，同时 NASA 在阿波罗登月计划结束后经费紧张，美俄两国原本计划各自建造新空间站的计划遇到了困难。1993 年，经过数次会谈，国际空间站这一计划终于落地——由美国和俄罗斯牵头组建，欧洲、日本和加拿大共同运营，共同打造史上规模最大的国际性轨道空间站。昔日太空竞赛打得不可开交的两大航天强国决

定携手共建如此规模的航天器，美国国家航空航天局局长丹尼尔·戈尔丁（Daniel Goldin）当时曾颇有深意地说：“同一个世界，同一个空间站。”

国际空间站建造过程繁琐复杂，跨度冗长。1998 年 11 月 20 日，由美国出资、俄罗斯建造的国际空间站首个舱段——曙光号功能货舱由俄罗斯质子号火箭成功发射，标志着国际空间站初期装配工作全面展开。之后的十几年内，空间站的建设过程相对顺利，多个舱段、桁架与太阳能板依次部署，逐渐形成了现在人们所熟悉的国际空间站外形。其中航天飞机凭借其巨大的货舱为国际空间站送去大型桁架、太阳能板及舱段，是建设国际空间站的主力航天器。

目前国际空间站总质量约 440 吨，长 73 米，宽 109 米，内部宇航员可活动的空间足足有 915.6 立方米，是人类有史以来当之无愧的最大航天器。

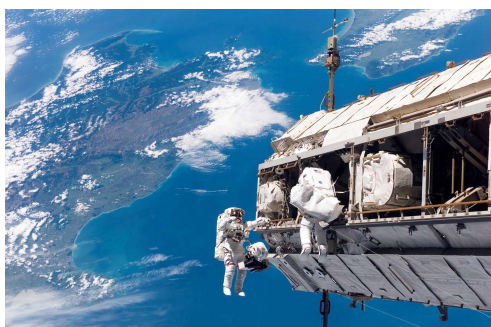


图 8.31 STS-116 任务的宇航员进行太空行走，安装桁架有关设备

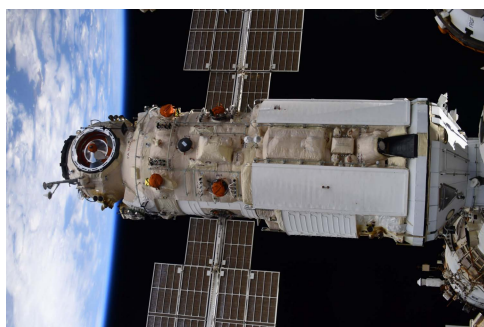


图 8.32 2021 年 7 月 29 日拍摄的“崭新”科学号实验舱

国际空间站是极好的科研平台，宇航员的主要工作就是进行科学研究。太空中失重的环境可以进行很多地面无法实现的实验。例如受重力影响，蛋白质晶体在地面生长时往往会产生缺陷。而在国际空间站微重力环境下可以培育出结构近乎完美的大尺寸蛋白质结晶，这种蛋白质晶体能够帮助地面科学家进行更精确的表征测定，在药物设计、疾病治疗领域大有用处。

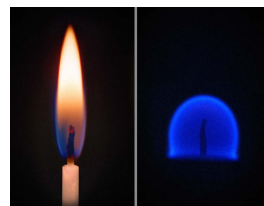


图 8.33 地面的火苗与国际空间站的火苗对比

国际空间站是有史以来人类建造过最昂贵的单件物品，总成本接近 2000 亿美元。但它对于人类科技进步的贡献却是无价的。国际空间站上开展多项科学研究对推动科学技术的发展与应用起到了不可替代的作用。半导体晶体制造、石化工业催化剂甚至胰岛素治疗糖尿病等深入到社会各行各业的革新技术，都有国际空间站的功劳。

国际空间站因其体积硕大，在过境期间可以清晰地用肉眼观测到。相关内容详见第五章第 4 节。

遗憾的是，因为美方人员狭隘地认为中国参与国际空间站会使中国“偷窃有关技术，触动美方利益”等原因，中国并没有加入国际空间站计划。但恰恰由于这种垄断，促进了我国航天技术的发展，让我们明白了自力更生的重要性。如今国际空间站老矣，美国想要将它的寿命延续到 2030 年，毕竟国际空间站若是退役，太空中就只有属于中国的空间站了。平心而论，垂暮之年的国际空间站还能赛得过初升太阳般的中国空间站吗？

中国载人航天工程及中国空间站（CSS）

中国载人航天工程于 1992 年 9 月 21 日由中国政府批准实施，代号“921 工程”，同期还批准我国载人航天工程按“三步走”发展战略实施：

第一步，发射载人飞船，建成初步配套的试验性载人飞船工程，开展空间应用实验。

第二步，在第一艘载人飞船发射成功后，突破载人飞船和空间飞行器的交会对接技术，并利用载人飞船技术改装、发射一个空间实验室，解决有一定规模的、短期有人照料的空间应用问题。

第三步，建造载人空间站，解决有较大规模的、长期有人照料的空间应用问题。

筚路蓝缕，中国前两步已经完美完成，目前中国航天人正在为第三步努力拼搏。

1999 年 11 月 20 日，**神舟一号**进行了第一次无人飞行试验。此后在 2001 年 1 月、2002 年 3 月、2002 年 12 月，神舟二、三、四号又进行了三次无人飞行试验。除神舟二号返回舱主降落伞展开失败，返回舱以 50 m/s 的速度硬着陆外，其余试飞任务均圆满完成。

2003 年 10 月 15 日，杨利伟乘坐**神舟五号**载人飞船圆满完成了我国首次载人航天飞行，飞船在太空运行 14 圈，历时 21 小时 23 分。

2005 年 10 月 12 日，费俊龙、聂海胜乘坐**神舟六号**载人飞船，在太空运行 76 圈，历时 4 天 19 小时 33 分，成功验证了多人多天飞行能力，标志着三步走的第二步顺利开局。

2008 年 9 月 25 日，翟志刚、刘伯明、景海鹏乘坐**神舟七号**载人飞船成功发射。航天员翟志刚与刘伯明成功地实施了中国第一次太空行走，五星红旗飘扬于宇宙之中。

2011 年 9 月 29 日，**天宫一号**目标飞行器成功发射。同年 11 月 1 日，承载着首次交会对接任务的**神舟八号**无人飞船发射升空，两天后天宫一号与神舟八号顺利实现中国首次交会对接，实现了中国空间技术的重大跨越。

2012 年 6 月 16 日，景海鹏、刘旺、刘洋乘坐**神舟九号**载人飞船，与天宫一号顺利实现手动交会对接，在组合体内生活了 10 天。



图 8.34 天和核心舱地面测试与发射

2013 年 6 月 11 日，聂海胜、张晓光、王亚平乘坐**神舟十号**载人飞船，与天宫一号对接，并成功进行太空授课，全国 6000 余万名师生一同观看了直播。

2016 年 9 月 15 日，**天宫二号**空间实验室在酒泉卫星发射中心发射成功。

2016 年 10 月 17 日，景海鹏、陈冬乘坐**神舟十一号**载人飞船，与天宫二号对接，完成了在轨 30 天中期驻留

任务。

2021 年 4 月 29 日，长征五号 B 遥二运载火箭搭载空间站天和核心舱，在海南文昌航天发射场发射升空。

2021 年 6 月 17 日，聂海胜、刘伯明、汤洪波乘坐神舟十二号载人飞船，与天和号核心舱对接，进行 90 天长期驻留任务，期间进行了两次出舱活动。

在 2021 年至 2022 年间，中国将接续实施 11 次飞行任务，包括 3 次空间站舱段发射（天和核心舱、问天实验舱、梦天实验舱）、4 次货运飞船以及 4 次载人飞船发射，于 2022 年完成空间站在轨建造，实现中国载人航天工程“三步走”发展战略第三步的任务目标。



图 8.35 神舟 12 号航天员在我国空间站拍摄的地球。图片来源见水印。

限于篇幅原因，更多有关载人航天的内容如前苏联登月计划、前苏联礼炮计划、前苏联航天飞机、美国空间实验室、前苏联/俄罗斯和平号空间站和新一代载人飞船等，请参阅本章补充阅读。

补充阅读

前苏联——登月计划

阿波罗 11 号任务的成功标志着美苏太空竞赛以美国获胜告终。苏联方面在阿波罗 11 号任务过后宣称人类登月既危险又没必要。苏联也否认美苏两国存在登月竞赛，自称“压根儿没这打算”。

事实上，早在肯尼迪发表登月公开演讲的六年前，前苏联就已经在 1956 年制定了登月计划大纲，并在 20 世纪 60 年代秘密推行了登月计划。因为一系列惨痛的失败，相关细节一直保密，外界对这一系列任务始终一知半解。直到 1990 年前苏联当局将部分细节公开解密，人们才逐渐了解到这位红色巨人破碎的登月之梦。

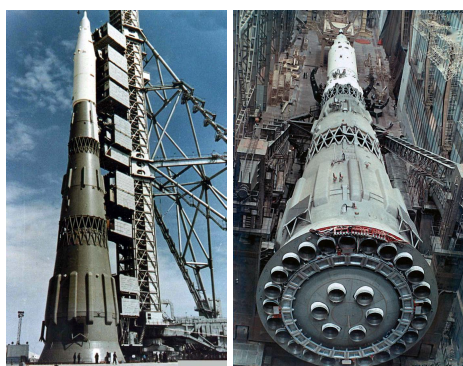


图 8.36 N1 火箭

1959 年科罗廖夫提出 **N1 火箭登月计划**，切洛梅提出 **UR-700 绕月计划**，二者各有所长，苏联高层迟迟没有明确支持某一个方案，决定同时发展，这直接导致两边的资金都不太够用。

科罗廖夫十分反感切洛梅的 UR-700 项目，因为 UR-700 火箭采用剧毒且低效的二氧化氮与偏二甲肼为燃料。科罗廖夫自己选拔人才，从比雪夫飞机制造厂提拔了新人尼古拉·库兹涅佐夫为 N1 火箭设计发动机。但

是这位新人缺乏相关经验，最终只设计出推力不足 175 吨的 NK-15 煤油发动机。相比之下，土星五号上的 F-1 氢氧发动机推力则达到了惊人的 680 吨。

推力不够，数量来凑，力大砖飞！科罗廖夫给 N1 火箭一级捆绑了 30 台 NK-15 发动机，从底部看起来活像一个蜂窝煤，这也为 N1 的数次失败带来了主要隐患，N1 火箭的四次发射失败的原因全都和一级火箭发动机故障有关。

1964 年，苏联政变，赫鲁晓夫下台，勃列日涅夫上台，这位新任领导人无暇顾及登月计划。加之 1966 年 1 月科罗廖夫突然与世长辞，苏联登月计划又蒙上了一层阴影。此时，美苏两国的登月计划研制进度仍不相上下。

瓦西里·米申（Васи́лий Ми́шин）是科罗廖夫的继任者。然而随后的事实证明，米申并不合格。1967 年 11 月，第一枚 N1 火箭与美国的土星 5 号几乎同时送上发射台，但地面测试时状况百出，一直折腾了一年多，1969 年 2 月 21 日才真正点火起飞，59 秒后所有发动机停机，在 52 公里外坠毁。

苏联人急了，仅 5 个月后的 7 月 3 日，第二枚 N1 火箭匆匆发射。离开地面几十米后，一颗螺丝进入燃料泵导致 29 台发动机停机。发射后 23 秒砸回发射台，2300 吨

推进剂引发猛烈爆炸，成为火箭发射史上最严重的事故。而此时，美国已经成功发射了阿波罗 9 号与 10 号，为最终的载人登月做好了全部准备工作。

第二枚 N1 火箭失败两周后，阿波罗 11 号成功登月，前苏联登月计划此时已经败下阵来。苏联高层对登月完全丧失兴趣，停止了切洛梅的 UR-700 项目。当然该项目也有遗产，虽然 UR-700 火箭胎死腹中，但略低级的 UR-500 火箭这一阶段性产品得以成功发射，并发展成为知名的质子号火箭，至今仍在服役。

在米申的坚持下，N1 火箭的研发得以继续艰难进行。1971 年 6 月 24 日，第三枚 N1 火箭在起飞后不受控滚转，失控坠落于 16 公里外。进一步改进设计后，1972 年 11 月 23 日，第四枚 N1 火箭在起飞后 107 秒时爆炸——这是 N1 火箭距离成功最近的一次，还有 7 秒钟一二级就会分离。

N1 计划自始至终缺乏资金支持，没有经过足够的地面测试，加上种种技术失误，最终导致了 N1 火箭的研发失败。曲终人散，1972 年，前苏联正式停止了他们曾经梦想过的载人登月任务。其间毫无回报的巨额投资也是加速苏联解体的原因之一。

前苏联——礼炮计划

1971 年，苏联的 N1 运载火箭接连受挫，苏联登月毫无建树，只好将竞争方向从登月转移到空间站建设之中。前苏联一项旨在建设空间站的庞大航天计划：礼炮计划（Salyut programme）拉开了帷幕。

自 1971 年至 1991 年，共建造并发射了 7 艘科研用途的“轨道空间站 ДОС”，即礼炮 1 号到礼炮 7 号；以及 5 艘军事侦察用途的“轨道试验站 ОПС”，即金刚石号。在前期，这些航天器有的发射失败坠入海中，有的入轨后失控坠毁。基于前期的经验教训，苏联又先后成功发射了礼炮 4/5/6/7 号空间站，总共有人驻守时间接近 2000 天，多次打破世界纪录。

这其中，其中最成功、最出名的当属礼炮 7 号空间站。礼炮 7 号于 1982 年 4 月 19 日发射成功，但之后遇到了断电、失联等麻烦，苏联当局经过一系列思想斗争，派出弗拉基米尔·贾尼别科夫（Владимир Джанибёков）与维克多·萨维内赫（Виктор Савиных）搭乘联盟 T-13 飞船前去拯救礼炮 7 号。援救工作惊险但相对顺利，成功延长了空间站的寿命。相关情节被改编成为电影《太空救援》。礼炮 7 号空间站在轨运行了 3214 天，其间宇航员共进行了涉及各个方面的 120 多项实验，极大地推进了科学的发展，取得了非凡的成就。

前苏联——暴风雪号航天飞机

美国航天飞机人尽皆知，但很少有人知道前苏联亦研制过航天飞机。苏联当局认为美国研制航天飞机是未来美国搭载核武器的工具，因此在 1976 年他们开展了雄心

勃勃的“暴风雪号”航天飞机计划（Buran programme）。为了显得比美国厉害，苏联航天飞机设计指标比美国高不少，这也造成了该项目烧钱不断。该项目是苏联太空探索历史上耗资最大的项目，在一定程度上加速了苏联解体的进程。

“暴风雪号”航天飞机共制造了五架正样机，仅有一架完工，在其生命周期中仅进行了一次轨道飞行任务。1988年11月15日，在由强大的“能源号”运载火箭发射3小时25分钟后，无人驾驶的“暴风雪号”航天飞机顺利着陆在拜科努尔航天发射场，迄今为止能够做到航天飞机完全自动精确着陆的国家只有前苏联。在这次堪称完美的首飞后，由于缺乏资金，苏联江河日下，该项目最终被取消。2002年5月12日，因为连日的大雨造成厂房倒塌，摧毁了这唯一的一艘遨游过宇宙的暴风雪号，令人无比唏嘘。这一计划也有遗产，为了暴风雪号试验而研制的世界最大飞机——唯一一架安东诺夫225，至今仍在服役中。



图 8.37 性能强大的“能源号”运载火箭发射“暴风雪号”航天飞机史诗般的场景。^①

美国——天空实验室

苏联宣布建设“礼炮号”空间站后，美国当然不甘示弱，也开始论证自己的空间站。随着阿波罗18到20号被取消，NASA多出三枚没有使用的土星五号运载火箭，这也使天空实验室（Skylab）的计划正式提上日程——能够发射天空实验室吨位的火箭只有强大的土星五号。

如果你初见美国天空实验室的照片，第一印象大概与一颗拥有太阳能帆板的普通卫星并无不同。这仅仅是在太空中没有参照物造成的假象，实际上，天空实验室的尺寸比一般人想象中要大得多：长36米，主体直径6.7米，重达90.6吨。对比来看，我国的天宫一号目标飞行器只有8.5吨。天空实验室宽阔的内部空间为宇航员提供了非常宽松的工作、生活环境，至今没有其他任何一艘单载体载人航天器能与之比拟。

1973年5月14日，土星五号拖着长长的火舌最后一次飞起，将天空实验室送入轨道。令工程师所料不及的是，天空实验室在入轨后，遇到了太阳能板无法打开、工作舱温度迅速飙升到80℃以上并超过量程等麻烦，他们怀疑有隔热作用的微陨石防护罩遭到了破坏。地面专家经历高强度头脑风暴后，决定了铺设遮阳伞、布设遮阳帘两种方案。经过十分紧张的设计与生产，成功将一面巨大的遮阳伞带上营救飞船。飞船发射后，航天员发现一面太阳能板不知所踪，另一面主太阳能板则被损坏的微陨石防护罩碎片缠绕，无法正常展开，与地面的判断相吻合。他们成功部署了遮阳伞，并且耗费九牛二虎之力展开了被缠绕的太阳能板。天空实验室如获新生，舱内温度立竿

^① 这是这只钢铁巨兽的第一次航行，也是遗憾的最后一次。

见影地降低了，他们的聪明才智和毅力挽救了这个耗资 25 亿美元的计划。

天空实验室先后迎来了三批次共九名宇航员驻留。期间开展了百余项实验，获得了大量科研成果，在物理学、生命科学、材料科学、地球观测甚至电影技术领域均有成果。其中里卡尔多·贾科尼（Riccardo Giacconi）因其对 X 射线天文学的研究及 Skylab 上太阳辐射的研究而获得了 2002 年诺贝尔物理学奖。



图 8.38 Skylab 2 机组成员离开时拍摄的战果——遮阳伞与展开的太阳能板

遗憾的是，NASA 当时经费紧张，航天飞机的研制进度迟缓，天空实验室的轨道高度衰减也快于预期。在近六年的孤独等待后，天空实验室没有等到航天飞机的到来，1979 年 7 月 11 日，天空实验室再入大气层，化作一道绚丽的火光在地球大气层中熊熊燃烧，少量碎片掉落在澳大利亚西南部的无人区，带憾而去。澳大利亚埃斯佩兰斯郡（Esperance）向 NASA 开出了 400 澳元的罚单，罪名是乱扔垃圾。

前苏联/俄罗斯——和平号空间站

在苏联礼炮计划结束后，苏联开始着手搭建第一个模块化轨道空间站——和平号空间站（Mir/Мир）。

和平号第一个舱段 DOS-7 核心舱于 1986 年 2 月 19 日发射，又历经多个实验舱段发射与对接，于 1996 年完成全部组装工作。和平号空间站完整体长 87 米，重 123 吨，有效容积 470 立方米。好景不长，1997 年 6 月 25 日，进步 M-34 货运飞船与和平号空间站在进行对接测试时发生碰撞，刚刚上天两年的光谱号功能货舱被严重损坏，直接导致和平号永久关闭了这个舱段，同时使和平号损失了将近一半的电能。

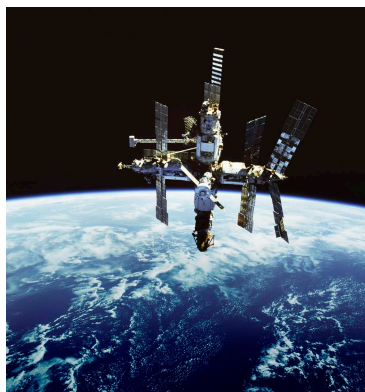


图 8.39 和平号空间站

和平号空间站在苏联解体后归俄罗斯所有。1991 年 5 月 18 日，苏联宇航员克里卡列夫（Крикалёв）乘坐联盟 TM-12 飞船第二次前往和平号空间站。然而在 1991 年 12 月 26 日，苏联解体，身在太空的克里卡列夫和另一名宇航员沃尔科夫被“遗忘”在了太空。1992 年 3 月 17 日，在太空滞留 311 天的克里卡列夫乘坐联盟 TM-13 飞船返回地球，是名副其实的“最后的苏联人”。

作为世界上第一个长期载人空间站，和平号共在轨道上运行了 15 载，大大超过了 5 年的设计寿命。15 年来，和平号共发生了约 1500 次故障，其中近 100 处故障一

直未能排除。遍体鳞伤的和平号空间站无力回天。莫斯科时间 2001 年 3 月 23 日凌晨 3 点 33 分，俄罗斯科罗尔耶夫飞行控制中心下达点火指令，和平号空间站发动机制动，进入坠落轨道。六个小时后，熊熊燃烧的和平号带着几代人的殷勤努力葬身天际。零星的碎片坠落在南太平洋预定海域，成为一代传奇。

新一代载人飞船

新一代载人飞船如万花筒般井喷，在役亚轨道级飞船 2 款，轨道级飞船 6 款，人类航天史上首次出现如此盛况。各大航天强国以及私人航天公司都参与到了这一场必然的改革潮流中。

亚轨道级飞船多为面向群众（富豪）的太空飞行体验而研发。2021 年 7 月 11 日，维珍银河（Virgin Galactic）创始人，英国亿万富翁理查德·布兰森（Richard Branson）与另外三名乘客乘坐维珍银河的“VSS Unity”太空飞机飞往太空，到达 89.2 公里的高度后体验了 4 分钟的失重，而后安全着陆地面，全球首次商业太空旅行圆满成功。九天后的 7 月 20 日，亚马逊创始人杰夫·贝索斯（Jeff Bezos）与其兄弟乘坐蓝色起源“新谢泼德”号火箭前往地表 100 公里高空。同行者还有最年长和最年轻的太空人：82 岁女飞行员沃利·芬克（Wally Funk）和 18 岁荷兰学生奥利弗·戴门（Oliver Daemen）。他们体验了大约 3 分钟的失重环境，11 分钟后安全降落。目前这两大商业航天器均已开始售卖船票。

轨道级飞船中，有我国的新一代载人飞船（未定名）、俄罗斯的奥勒尔号载人飞船（Orel）、美国的猎户座载人飞船（Orion）、美国波音公司的星际客机（CST-100 Starliner）和美国太空探索公司的龙-2 飞船（Dragon V2，或称为载人龙）。

俄罗斯奥勒尔号载人飞船代号“PPTS”，正如其名，进展缓慢还停留在 PPT 阶段。波音公司的星际客机进展稍快，2019 年 12 月 20 日波音公司信心满满地进行了第一次无人轨道飞行测试，然而它的飞行软件代码 Bug 满满，入轨后发动机异常，烧掉了过多燃料，无法与国际空间站对接，丢人地结束了任务。表现最为抢眼的是 SpaceX 公司的龙-2 飞船，2020 年 5 月 30 日在美国佛罗里达州的肯尼迪宇航中心成功发射，将两名 NASA 宇航员顺利送入太空。

我国的新一代载人飞船公开技术资料不多。它采用两舱结构布局，全长约 9 米，发射质量 21.6 吨（最高可达 23 吨），返回舱直径 4.2 米，最多可搭载 6 到 7 名航天员，且可重复使用 10 次以上。飞船根据推进舱大小可以衍生两种不同构型，一种推进舱较短，服务于近地轨道空间站的建设。而另一种推进舱较长，可服务于载人月球探测和载人深空探测等多种任务。2020 年 5 月 5 日，长征五号 B 运载火箭首次飞行任务取得圆满成功，新一代载人飞船试验船成功遨游天际，期待中国航天员乘着它去往月球的那一天！

第九章 资源

从入门到菜鸟再到老手，既需要相当的实地观测经验，也需要一定的天文知识积累。天文知识的积累本身就是一个收集、加工与记忆信息的过程。此外，为了实现一次成功的观测，您需要了解哪些地方适合观测，如何到达观测地，还有观测地的天气情况。这涉及到大量信息的获取，仅凭借一本青天指南难以涵盖足够多的信息。本章将给出一些可供参考的信息来源，包括书刊以及网络资源。除此之外，本章的最后结合青天会会员的观测经验给出一些北京市周边的观测地的信息，以方便读者进行观测活动。

① 天文读物和观测指南

市面上的天文科普书非常多，但其质量实际上参差不齐。我国的天文科普水平其实相当落后，因此大多数经典著作出自外国天文爱好者之手。一本好书会大大刺激你开展自己的观测活动，而一本质量较差的书往往充斥着过时、错误、无聊的信息。以下列出一些推荐书目：

《夜观星空·天文观测实践指南》 强烈推荐给所有对天文感兴趣的人。本书是最好的天文观测入门书之一，为进行观测实践提供可靠的指导。阅读它不需要任何天文基础，并且它足以陪伴你成为有经验的天文爱好者。作者 Terence Dickinson 是加拿大资深天文爱好者，同时也是知名的天文作家。本书的译者是国内天文学家谢懿，翻译的质量非常高。

本书从观测实用需求出发，准确、清晰、简洁地介绍了天文基础知识原理，观测实用技巧，以及四季星空、深空天体、太阳系天体和特殊天象的观测方法，并且有丰富的配图和精彩的说明。此外，本书提供的星图非常棒。一类是标注了各种寻星方法的大范围星图，适合初学者熟悉亮星和星座的位置；另一类是分片的深空星图，包含了两百个左右值得观看的天体，并有丰富的数据和描述。书中还有一个章节专门介绍业余天文器材的基本知识并提出了中肯的购买建议。对于入门天文爱好者：购买合适的双筒望远镜，带上《夜观星空》或其他星图，到尽量远离光污染的地方，在晴朗的

夜晚试着寻找各种天体吧，星空之美一定会超乎想象。

《天空的魔力》/ *The Backyard Astronomer's Guide* Dickinson 的另一著作，美亚上好评如潮。本书是《夜观星空》的进阶本，更为技术化的观测指南，尤其适合确实想要购买一台天文望远镜的读者，因为这里有更全面丰富天文器材的推荐和操作方法介绍，针对目镜和望远镜其他配件分别有单独的章节。然而本书的翻译质量很低，只推荐看英文版。

《“哈勃”的宇宙：最伟大的发现和最新的影像》 Dickinson 的第三本书。本书收纳了 300 多张哈勃照片，详实地介绍了这些图片的内容、意义和相关天文学知识，还介绍了哈勃空间望远镜的历史和一些哈勃照片的来龙去脉。这些照片单纯欣赏已能大饱眼福，但要更好领会其中的内涵还需要读者有一定的天文基础。

《探寻宇宙：现代天文学通俗指南》 Dickinson 的第四本书，一本常规天文学入门书。和《夜观星空》相比，本书更侧重于理论知识。主要内容囊括了太阳系、恒星及其演化、宇宙学、人类太空探索以及有关外星生命的一些探讨。本书同样插图丰富，装帧精美。

《天文迷的夜空导游图》 国内最好的深空天体观测指南，一本神书，适合有天文望远镜或高倍双筒望远镜的爱好者。本书整合了北半球 50 个星座中几百个夜空中最棒的（并且是适合观测的）星团、星云、星系、双星的详尽资料、寻找方法和作者的观测感受；更可贵的是为大多数深空天体配上了实际观测效果的示意图供读者参考（大多出自某巡天望远镜）。本书开头还有精彩的深空天体观测导论和器材选择导航，同样是非常宝贵的干货。本书由知名人士魏晓凡翻译，值得信赖。不过这本书印刷质量不高。

《天文观测完全手册》 2015 年出版，非常值得一读的国产好书。这本书的定位和《夜观星空》相似，但无疑更具本土特色和时效性，《夜观星空》的最新版毕竟也是 15 年前的了。本书兼顾观测和摄影，除了全面的观测和天文摄影概论外，也针对各种业余观测目标分别介绍观测和拍摄方法。本书的特色还包括更为详尽的星座辨识和国内天文资源的内容，但是在深空天体方面笔墨相对不多。

《漫步中国星空》 这是一本介绍中国古代天文学和中国星官的书，反映了古代中国人独特的宇宙观。从紫微太微到天市二十八宿，无不是宝贵的传统文化瑰宝。本书借助清晰的中西对照星图，将天上的琼楼玉宇娓娓道来，适合对中国星空感兴趣的读者。

《星座之美》 日本的科普书之一。姊妹篇是《宇宙之美》，后者偏基础天文理论，介绍的内容比较简单，主要受众是广大中小学生。《星座之美》相比要好不少，而且有藤井旭大神做摄影担当，值得一看。本书包含大多数星座的简介、特色和神话故事，并配有包含连线 and 图绘的星野照片。本书对了解神话和配合星图实际认识星座是

不错的。

Binocular Highlights 非常推荐的双筒观星指南，提供了近 100 个适合双筒望远镜观测的目标，并且每个目标都配有专门的星图，此外对双筒望远镜的选购也提出了有价值的建议。作者文笔很好，对各个天体的描述生动形象。本书市面上只有英文版，但是善用搜索可以找到电子书甚至是中文翻译。

The Urban Astronomer's Guide 一本针对光污染比较严重的天空的观测指南，主要针对天文望远镜对深空天体的观测。通过介绍配件和观测技巧，指导读者在极限星等只有 3 ~ 4 等的天空中寻找有趣的目标。阅读此书可以极大提高观测能力。

《天文学新概论》 北京大学天文学基础课程的参考书，内容涉及到了天文学的各个方面。作为一本天文学教材，它与上面提到的一些书籍相比更偏重于天文学本身，而不是业余观测。本书在编写的时候也大量参考了这本教材。

由于篇幅有限，不可能把优秀的参考书一一详述。经典读物还包括《大众天文学》《图解天文学》《DK 宇宙大百科》《宇宙的奇迹》《恒星与行星》《千亿个太阳》，*Turn Left at Orion*，*Cosmic Challenge*，*Deep-Sky Companions Series*，*Choosing and Using Series* 等等。

2 星图

尽管现在越来越多的人使用电脑软件或者手机 App 来获知天体的位置，但星图对于严肃的天文观测有不可替代的作用，因为电子设备的光会破坏你的暗视力。以下推荐一些最经典的全天星图：

活动星图 注意！这不是一本书，是一类最简易圆形双层星图的总称，通过旋转模拟每一日晚上的星空，一般仅限于在特定纬度地区使用。活动星图曾经被初学者广泛用来认识星座和最亮的星星，但是现在它的实用价值已经非常有限了，然而青年天文学会仍然会拿它作为活动的奖品。

夜观星空·天文观测实践指南 书的中间部分有 20 张分片星图，极限星等是 5 等，记录了天文爱好者经常观测的天区中一些有趣的目标，对于面对海量天体有选择困难症的爱好者简直是福利——挨个看不就行了，都是最入门、最有趣的目标。

诺顿星图手册 老牌的星图手册，中外很多爱好者都在使用，口碑反响不错，除了星图还有些基础知识。但硬纸本的设计不适合观测时使用。

实用全天星图 科学普及出版社出版的 6.5 等星图，应该是国内最广泛使用的。现在新出了同系列的彩色全天星图，但是感觉彩色版主要是观赏使用的。

Pocket Sky Atlas 口袋星图。天空与望远镜杂志社出品，非常好用的 7 等星图。

世纪天图 北京天文馆出品的 8.5 等星图。

除了星图之外，还可能需要用到月面地形图或专门的深空星图。关注太阳系天体运动的爱好者还会去购买天文年历。

③ 杂志

订阅或购买天文杂志可以了解最新的天象和天文发现。除了专题知识外，杂志上还会刊载其他天文爱好者的观测经验、随笔杂谈、摄影作品等。国内最著名的天文杂志是《天文爱好者》和《中国国家天文》。《天文爱好者》是中国天文学会和北京天文馆主办的月刊，1958年创刊，至今已有六十余年，是影响力最大的天文科普杂志，适合各级别的爱好者。近年我们社团曾有数位会员在其上发表文章，此外《天文爱好者》每年的增刊也是非常好用的天文年历。

《中国国家天文》则不太推荐，它更类似《中国国家地理》杂志，天文方面的实用性相比也稍差，不过其中的“Sky & Telescope”（天空与望远镜，国外著名天文杂志）专栏有时会有不错的文章。这一专栏主要选登 Sky & Telescope 杂志的版权合作文章。

④ 软件和手机 APP

大多数电脑或手机上的天文程序最大的实用性在于星空模拟功能，软件能够模拟各种天体的运行情况，用户只要输入地理位置坐标和当前时间就能获知当地星空的实时状况。特别是将手机或 iPad 对向天空时，可以恰好呈现出你当前面对方向的景象，对于辨认星座或认识天体非常方便。这一类软件包含全面的天体数据资料库，移动 APP 大多还具有天象预报、过境预报以及多种有趣的拓展功能。

Stellarium（虚拟天文馆）是电脑上最普及的天文软件，功能全面操作简单。调节时间流逝速度可以以不同节奏观看斗转星移和各种天象奇观。其特色包括可靠的光污染模拟功能和各种文化的星空系统。Stellarium 是开源软件，世界各地的天文爱好者为其制作了许多插件和脚本，大大丰富了它的模拟功能。它的下载地址为 www.stellarium.org。功能相似的软件还包括 Celestia, StarryNight, WorldWideTelescope 等。

还有一系列更注重模拟的娱乐型软件，它们通常具有非常华丽的界面和强大的功能。Space Engine 是一个三维太空探索的模拟程序，有约 13 万个真实天体和程序生成的未知天体可供探索，官网上有免费下载。Universe Sandbox 是一款宇宙模拟沙盘游戏，在真实数据（可修改）和实时演算的基础上模拟各种各样的东西，例如三体系统、炸掉某个星星，适合天文爱好者来开脑洞。这个游戏可以在 Steam 上购买。

移动端也有很多选择，不过很多应用都需要付费购买。上文提及的 Stellarium 也提供了手机版本，但无论安卓版本还是 iOS 版本都是收费的。除此之外，手机星图应

用还有 StarWalk, MobileObservatory, StarChart, SkyGuide 等。还有一些其他天文相关的应用:“天文通”微信小程序提供了天气预报、天象预报、光污染地图等功能以及一个简单的星图,Heavens-Above 提供了人造天体过境的信息。具体使用哪一种取决于实际需求和感受。

此外对于兴趣比较具体的爱好者,他们会需要针对性更强的软件。如叠加星轨软件 Startrails,深空摄影后期软件 PixInsight,卫星追踪软件 Orbitron 等等。如果您需要使用这些软件,可以向其他爱好者咨询或从网络上收集信息。对于这些软件的详细介绍超出了本书的范围。

5 网络资源

网络上有大量高质量的天文资讯,善用搜索功能一定能获得需要的内容。以下分类列出一部分实用网站,其中有些在本书其他部分已经出现过。

天文相关网站

<https://www.meteoblue.com/> 一个天气查询网站,每日两更(大约在北京时间 3:00 和 15:00)除了分时的天气预报之外,还提供云层的高度分布预报、视宁度预报、月出月落时间等对天文观测十分重要的信息。

<https://www.windy.com/> 另一个天气预报的网站,提供多种数值预报模式在地图上的可视化,适于对比多个观测地。更新频率高于 meteoblue,有些模型可以一日四更。但是不同模型数据差别经常很大,往往会使人难以作出决定。

<https://www.lightpollutionmap.info/> 这个网站提供光污染信息的查询。

<https://darkmap.cn/> 天文通提供的光污染地图,它提供的是 2015 年左右数据,因此需要谨慎使用。

<http://www.heavens-above.com/> 这个网站提供人造天体过境和太阳系天体查询。

<https://interesting-sky.china-vo.org/> 有趣天文奇观。该网站包含全年重要天象、每月天象预报等实用内容,还提供太阳系天体凌、掩、冲、合等天象的信息、其他重要的业余天文相关网站链接以及近期一些天文方面的新闻。读者可以从该网站学习到不少天文知识。

<http://www.imo.net/> 国际流星组织的主页。可以了解相关知识,下载流星雨年历。

<http://hubblesite.org/> 哈勃望远镜的网站,可以观看下载图片和视频。

<https://bbs.imufu.cn/> 牧夫天文论坛。有悠久历史的国内著名论坛(也应该

是最大的了), 商业化气息浓厚, 版面区分做的不错, 高手很多, 菜鸟也不少, 有不少精华贴值得一看。

[百度天文吧](#) 里面的一些精华贴很有参考价值。

<http://www.cloudynights.com/> 国外著名天文论坛, 一个真正的天文爱好者社区。

其他有用的网站还包括 NASA, Sky&Telescope 的相关网站和栏目; 此外, 北京大学图书馆购买的数据库中也有些与天文有关, 可以在图书馆主页查找。

社交平台

随着社交网络的发达, 微信、微博等也成为了获取天文知识的平台。学会的公众号“北大青年天文学会”会定期发一些天象预报、天文照片与天文科普等内容, 欢迎读者扫描旁边的二维码进行关注。牧夫天文会定期推送天象预报, 观测指南和科普文章。公众号 EasyNight 和微博 @EasyNight 每天会推送萌萌的天文科普漫画, 非常推荐刚入门的天文爱好者关注。其他推荐的微博账号还有 @Steed 的围脖、@星空往事_朱进、@小龙哈勃等等。



6 公众设施

北京天文馆落成于 1957 年, 是有悠久历史和极大影响力的天文科普展览馆。天文馆的最大特色是上映的各种天象仪节目, 天象仪将星空投影到观众头顶的 360° 球幕上进行演出, 很有身临其境观星的感觉, 震撼人心。在馆内有常规的天文科普展区和定期更新的主题展览。精致的天体模型、珍贵的月球岩石样本、专业的志愿者讲解等等都是展览的亮点。此外, 天文馆还会定期举办免费公众科普讲座, 详细信息可以关注他们的主页 www.bjp.org.cn 或微博 @北京天文馆。一般来说, 北大青天会每年都会组织参观北京天文馆至少一次。

我国各地分布有许多天文研究机构和公众天文台。参观 LAMOST、FAST 等观测基地或大型天文台可以很好了解天文研究和观测方面的相关知识。然而大多数中小型公众天文台的维护都很糟糕, 最好不要指望那些望远镜能带来多好的目视观测体验。在这些景点中, 北京古观象台、南京紫金山天文台等有不错的参观价值。近几年来, 使用远程天文台进行天文摄影逐渐流行起来。青天会购买了分别位于云南和智利的两座远程天文台的机时, 并开放给会员使用。

7 北京附近的观测地

毫无疑问,北京是一个特大城市。从地形来看,北京三面都是崇山峻岭,这给北京的对外交通带来的极大的不便。但是由于北京周边山区开发强度低,夜间受人造光源的影响比较低,且海拔较高,一定程度上也可以减弱北京城区灯光的影响。使得这些区域成为了潜在的理想观测地。除此之外,从气候上来看,北京降水较少,气候干燥,这对天文也是十分有利的。这些因素均使得北京成为对天文爱好者比较友好的一座城市。网上能查到较多有关北京周边观测的信息,但是由于经济社会的快速发展,其中一些信息已经过时,里面提及的很多观测地的光污染已经比较严重,不再适合观测。青年天文学会每年都会组织多次外出观测活动,本部分结合青年天文学会会员近年来的观测经验,对北京周边的一些交通和食宿比较方便的观测地做一些介绍,以方便读者选址。需要露营和大量徒步的观测地不在本部分介绍范围之内。

北京华海田园度假村 位于延庆区旧县镇。从北大出发驾车不足 100 km,且基本全程高速,附近也有公交站,交通比较方便。华海田园是一个比较成熟的天文观测庄园,承载量比较大,有比较好的观测平台(有 220 V 电源),也可以提供一些观测器材(需要收费),住宿地离观测平台非常近,便于随时取暖。从观测条件上来看,由于其离北京城区和延庆市区都比较近,南侧光污染比较严重;北侧有山,有一定遮挡。青年天文学会曾经多次在此地举办大型观测活动。但是在 2020 年底组织观测时发现其正在进行大规模改造,食宿和观测体验都有所下降,建议有意去观测的同学提前联系了解清楚情况再决定。

喇叭沟门满族乡敬老院 位于怀柔区喇叭沟门满族乡。从北大驾车出发大约 150 km,大部分路段没有高速公路,且有一段路坡陡弯急,对晕车的人略微不太友好。由于敬老院离镇中心比较近,此观测地乘坐公交也比较容易到达。敬老院可以提供餐饮,但是如果人少可能餐饮质量非常低(不提供炒菜),可以在镇上的饭馆用餐。敬老院承载量不大,但住宿条件十分安全,身体如有不适可以随时按铃求救。观测地在敬老院楼顶的平台上,可以用电梯将重型器材送到顶层,再搬到平台上。从光污染的情况来看,由于距离城区较远,此观测地光污染背景低于华海田园;但是一个不太好的因素是敬老院院子里的地灯整夜不灭,对观测体验有一些影响。另外需要提及的是,此观测地只有周末开放。

花台 位于房山区蒲洼乡。从北大驾车大约 150 km,路线对晕车者不友好,公共交通可及性差。此地是京郊一处景区,夏季人多,农家乐也比较多,食宿比较方便。但是冬季天气寒冷,大部分农家乐关闭,只有鑫霞农家院一处开放,且需要交定金。鑫霞农家院住宿条件一般,承载量也不大,因此青天会的大型观测没有去过这个地方。观测条件看,鑫霞农家院有一可提供市电的观测平台。观测环境来看,光污染

情况好于华海田园；海拔较高，因此比较冷，但某会员声称在此地比其他地方看到的星点的颜色更加真实；北侧有山，有一定的遮挡。

孙栅子 位于怀柔区喇叭沟门满族乡。隔壁天协常在此地组织大规模观测活动。交通情况与喇叭沟门敬老院类似，但是公共交通并不方便。由于靠近喇叭沟原始森林公园，农家乐很多，食宿比较方便。观测条件看，目前未了解到有哪家农家乐可以提供观测平台，因此需要自行在野外寻找观测地，因此没有市电。与喇叭沟门乡敬老院相比，孙栅子地面光源少一些，光污染更轻一些。

云州水库 位于河北省张家口市赤城县云州乡。从北大出发驾车大约 200 km，虽然需要翻越崇山峻岭，但由于京礼高速开通，路线相对平坦。水库岸边的国道附近有一些食宿地，价格低，但是口味一般，住宿条件也比较简陋，且需要自己在野外寻找观测地。如果想提高品质可以在县城或者镇上用餐。此地的主要优势是观测环境，由于水库的存在，遮挡比较小，而且远离北京市，光污染比北京市内的观测地要轻不少。

下面再罗列一些以前常作为观测地而现在不再建议去的地方。古北口曾经是青年天文学会组织大规模观测常去的一个地方，但是近几年由于古北口镇开发强度很大，光污染程度已经比较严重了。官厅水库也是青天会曾经的一个观测地，但是由于水库沿岸开发强度逐渐增大，也不再适合作为观测地。除此之外，柳沟、石塘路、不老屯、黄花城等地在网上时有提及，但是这些信息往往都是陈陈相因下来的，目前也不再建议将这些地方作为观测地。

第十章 青年天文学会简介

1 基本情况

青年天文学会全称北京大学青年天文学会（学生社团），简称青天会，是由热爱天文的北京大学学生自发组成的非营利性学术社团，是全北大最大的学术科创类社团之一，截至 2021 年，已十三次被评为“十佳社团”或获得同等级荣誉。对内，学会聚合全校天文爱好者，共探星空的美丽神奇，对外，学会科普天文知识，增进全校同学乃至社会公众对天文学的了解。我们遍访江南塞北，寻找心中那片澄澈的夜空；也曾走入寻常巷陌，将浩瀚的天文知识带给千家万户。青年天文学会成立于 1990 年 4 月 25 日——哈勃望远镜发射升空的次日。三十多年来，学会始终致力于与更多人分享天文之美，共同守护头顶灿烂的星空。

2 活动介绍

青年天文学会组织丰富多样的活动，无论是学术大佬、天文爱好者，还是完全零基础的天文萌新，都可以在青年天文学会的活动中获取最丰富的天文知识和最生动有趣的科普观测体验。本部分介绍的活动是 2020~2021 学年的常规活动，学会会根据具体情况适时开发更多全新活动。

学术科普活动

系列科普讲座 自成立以来，青年天文学会就广邀中国乃至全世界的天文领域大咖，为大家深入浅出地讲述宇宙奥秘，普及天文知识。近来的一系列天文科普讲座更是将万众瞩目的科技热点与背后的科学知识紧密结合，带来了诸如“《流浪地球》的科学与审美”“黑洞照片的科学奥秘”“引力波时代”等广受好评的科普讲座。未来，我们还将邀请更多细分领域的专家学者，为大家带来全方位的科普体验。

天文沙龙 与科普讲座相比，天文沙龙的优势是更加精致而灵活。在这里，同学们可以和老师或博士学长学姐们零距离交流，面对面探讨感兴趣的天文话题。

天文台（馆）参访 每个学年中，学会都会参访一些天文台、天文馆或相关的天文科普场所。包括但不限于国家天文台兴隆观测站、北京天文馆、古观象台等。部分活动与人大星月空天文社等合办。在未来，我们还将踏遍江南塞北，参访 FAST 天眼、云南天文台等全国各地的知名天文台（馆）。

会内培训 对于接触天文不久的同学，学会将组织会内骨干系统性讲述各方面的天文知识和观测方法，让大家轻松入门，快速提高。

科普推送 学会坚持进行每月天象预报的推送，每逢特殊天象也会向大家科普天象原理和观测方法，此外还有不定时推出的行星系列等多个系列的科普推送。

小组活动 青年天文学会有航天、天体物理、气象三个小组。小组活动由会员自主发起，学会协助建设。学会欢迎更多对天文相关细分领域有兴趣的同学筹建新小组。

观测活动

例行观测 学会以每周一次左右的频率，依据天气状况在静园或理科二号楼门口进行观测。通常的观测内容为星空导览和入门级深空天体。此外，当有重大天象时，学会会至少组织一次例行观测或外出观测。

圆顶参与观测 每月约一次，学会会带领会员参观理科二号楼圆顶天文台，并用圆顶望远镜进行观测。

外出观测 外出观测是学会广受欢迎的活动之一，理论上每个月朔日前后的周末均可成行。受天气、学校期末考试等因素影响，一般每学年成行 3~4 次。近几年最常用的观测地点为延庆区华海田园天文农庄和怀柔区喇叭沟门满族乡。

其他观测 根据情况，学会还会组织日间太阳观测、暑期远征等多种观测活动。

摄影活动

远程天文台开放 学会拥有丽江和智利远程天文台的拍摄机时。有志于使用远程天文台拍摄星空的同学可以依据学会机时管理办法，使用学会机时拍摄天文摄影作品。

青天摄影课 学会会请会内擅长摄影的同学传授天文摄影技巧，包括前期拍摄和后期处理，囊括了深空、星野、延时摄影等多种题材。

APOW 每周一图 效仿 NASA 的每日天文一图，我们每周会推送一张会员的天文摄影作品，并配以对应的科普解说。

③ 发展历程

本节内容主要节选自青年天文学会《会史》。

“学会最初的三分钟”

时钟拨回北京大学青年天文学会成立的 1990 年。这年，无论是北京大学校内，还是整个社会，环境都与现在有着极大的不同。在校内，当时的气氛十分沉闷，一个能够活跃学校气氛的社团组织正是广大同学们所希冀的。而在校外，广大人民的文化水平和科学素质较低，各种伪科学盛行，与天文有关的迷信遂甚嚣尘上，天文知识科普便成了当时天文人的一大要务。

当时地球物理系天体物理专业的班主任方晴老师认为，是时候成立一个天文社团，既能带同学们玩起来，又能像大众普及天文知识，破除迷信。于是，在 1990 年 4 月 25 日——哈勃望远镜升空的次日，北京大学青年天文学会正式诞生了！学会最初的三届会长为地球物理系 88 级的几名本科生，这些同学也构成了学会的第一批骨干力量。这批同学为学会做出了巨大的贡献，其设计的会徽至今仍在使使用，讲座、校内观测和中秋赏月的活动都已开展，并出版了会刊《天文探索》。因为活动出色，青年天文学会被评为北大五大优秀社团的第三名。

但由于创会之初事务繁忙，课业压力较大，社团与学业无法兼顾，而且由于招生原因，天体物理专业的本科生数量太少，这就导致仰仗天体物理专业的青年天文学会遇到了些许麻烦。于是，在 1991 年秋，学会交给了地球物理系 91 级研究生张华伟等几名同学，构成了学会第二批骨干力量。在新的理事会的努力下，学会继续发扬光大。

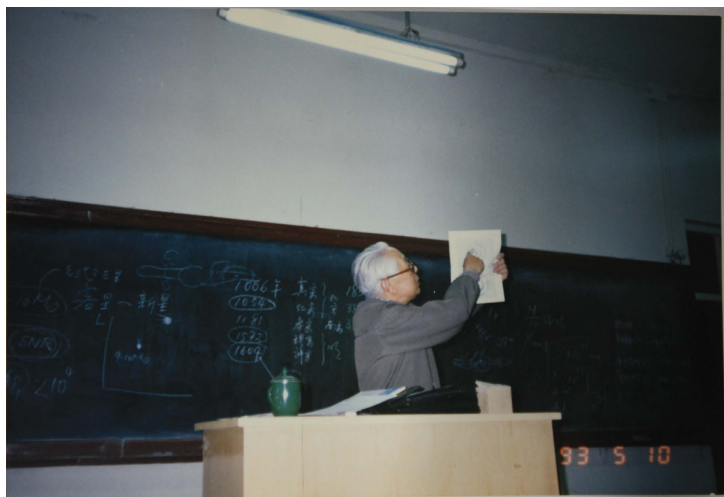


图 10.1 1993 年北京天文台李竞老师作以“超新星”为主题的讲座

学会正式提出了“着眼普及，适当提高”的宗旨，本着这个宗旨学会举办了不少活动。除邀请当时著名天文学家所做的讲座以外，骨干自己也讲解了几次基础的天文知识，取得了很好的效果。路边天文的形式也吸引了大量师生的兴趣。除之前的活动良好的继承外，还走出象牙塔，组织了远赴大庆和哈尔滨的社会实践，加强了天文普及届的交流；学会还举办了知识竞赛，这是学会当时最盛大的活动，吸引了全校同学前来参与，举办场地常常坐不下。在1992年，学会被评为北京大学十佳社团。1994年及以后，会长均为本科生担任，学会的组织机构与活动经验基本齐备，并有天文学系坐镇指导，不仅传承不断，而且举办了很多出色的活动。

早期发展

90年代中后期，中国天文科普也进入了一个高峰期。就在这段时期，青年天文学会进入了黄金时代，高潮迭出。1994年，学会建立了“会员联络网”，即在会员比较集中的宿舍楼设几名联络员，由会员自愿担任，使会员能及时了解活动信息，加强学会与会员的联系。为了方便查阅天象，学会还油印了重大天象的资料，在那个科技不发达的年代里十分不易。1994年的彗木相撞成为当时一件非常重要的天文时事，而学会也对此进行了很多宣传与讲解。

在校内，学会的活动广受欢迎。中秋赏月、彗星和日食的观测都吸引了不少同学参加。学会还创办了“天文科普周”这一活动，以宣传现代天文学的成就，丰富北大校园文化。1995年的天文科普周共举办了四次活动，还邀请了南仁东作了《射电天文学》的报告，共有千余人参加了活动，在校内外引起了较大反响。天文科普周这种形式的活动，陆续开展了六届，取得了不小的成果。

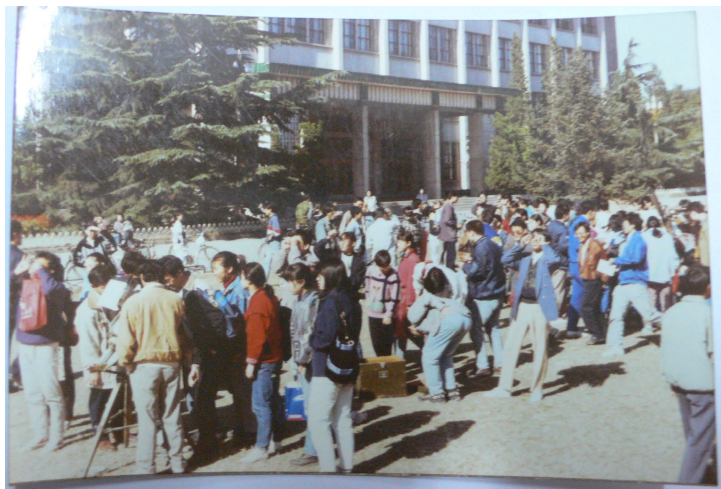


图 10.2 1995 年天文科普周的日食观测

1998 年，学会再次组织社会实践团，赴江苏淮阴进行社会实践。学会骨干在淮阴中学、清江中学、淮安中学、清浦中学、淮阴师范附中进行了科普讲座，市电视台制作了专题节目在当地播出。《天文爱好者》杂志也报道了活动的盛况。1995 年—1997 年，学会连续三年被评为十佳社团，学会与其他天文团体的交流也日益密切。

■ 新世纪的高光与危机

时值新千年刚刚到来，网络开始走进千家万户。学会有了自己的网站。而未名 BBS 的天文版开版后，很快成为了天文学系和学会成员发布活动通知、讨论活动安排以及聊天灌水的主阵地，热闹非凡。

2001 年狮子座流星雨爆发，学会为此次观测成立了特别筹委会，决定派出两支队伍同时观测。其中一只是大部队，观测地点选在了安全便利的昌平校区。另一支由有一定摄影基础和流星观测经验的同学组成，观测地点选在环境更好的密云石塘路。是夜，星陨如雨，据说 ZHR 最高超过 3000。这次观测在参与的同学心中留下了难以忘怀的回忆。

2002 年，学会与清华联合举办“北大清华天文知识竞赛”，这是学会第一次与其他高校合作举办知识竞赛。此外还有一段插曲。2003 年上半年，华夏大地遭遇“非典”的侵袭，原本计划举办的天文文化周无法如期举行。但是疫情无法阻止同学们对天文知识的探求。学会推出了网上天文节，在 BBS 上进行了经典讲座回顾、网上图片展和业余天文知识介绍，并每日进行一次天文知识有奖问答。



图 10.3 2002 年北大清华天文知识竞赛

然而，学会却在不久之后却遇到了一个前所未有的变局。2000 年北京大学天文

学系成立，天文学系的学生至大二再自行选择专业，没有了大一、大二的天文学生，选择到天文学系作毕业论文的人一年比一年少，学会骨干中天文学生的比例也大大降低。因此，学会的发展陷入一阵低潮。但是，即使在这个困难时期，学会骨干们仍然在新的宗旨“简单天文”的指导下，用自己的汗水与智慧，把每一次活动办好。在这一时期仍然涌现出了不少有新意的活动，特别是外出观测活动开始稳定举办，还建立了比较完善的管理系统。

学会的复兴与改革

2007年，天文学系终于恢复了独立招生。当年，就有20多名优秀学子入读天文学系。让学会变得更好，成为了学会那一代人的孜孜以求的目标。

2008年到2012年，中国连续上演多次震撼的日食天象，2009年又是国际天文年。在学会时任骨干，特别是副会长刘博洋等人的精心策划下，一系列提振学会声望的活动陆续开展，学会的复兴开始了。2008年和2009年暑假，学会派出多支实践团，观测日全食并进行多项科学试验，一路上开展多样的活动宣传天文科普知识，与各天文爱好者团体交流座谈。

在这一时期，北京高校天文社团之间的交流研讨也陆续开展。2009年，学会承办了第四届北京高校天文社团研讨会，这场会议催生了现在的北京高校天文社团联盟的前身。2010年，学会在内蒙古锡林郭勒举办了全国天文社团发展论坛，将天文社团之间的交流从北京内部推广至全国。学会还在北京天文馆隆重庆祝了学会成立20周年。一系列重大活动极大地提高了学会在北大内部、北京高校社团间甚至全国天文学界的影响力。这一时期打响的名号，在接下来几年都“余威震于殊俗”。



图 10.4 2010 年的全国天文社团发展论坛

值得一提的是，2011年10月19日，值中国人民大学星月空天文社五岁生日之际，青天会对星月空进行“求婚”，并举行了“婚礼”，现场十分热闹。此后两会感情一直很好，多次交换礼物，共办活动。星月空和青天会也有多名社员之间相互结成了深厚的友谊，传出了多段佳话。

2012 年，时任会长陈昱光推行了一系列改革措施，使学会焕发新的生机。他对会内的组织结构进行了改组，创立了学会的小组活动制，建立了流星组、摄影组、理论组、气象组等小组，以适应新的发展前景。他还推行了会内分组培训的制度，组织编写了第一版的《青天指南》，对学会的发展起到了很大作用。在这一时期，学会的活动十分丰富，各个小组均有自己的特色活动，例行观测和学术讲座作为学会的支柱活动有条不紊地进行，学会的凝聚力也大大增强。从 2015 年起，学会每年均获得十佳社团的称号，皆受惠于这场改革。此后，小组活动的形式虽然逐渐淡化，但仍保留至今。

今日气象

寒来暑往，日月盈昃，青年天文学会也已三十而立。一路走来虽偶有曲折坎坷，却始终步履不停。自 2016 年以来，学会已连续 5 年获得北大十佳社团称号。

最近几年来，学会依旧举办了许多高质量活动。2016 年，学会编写了青天指南第七版，也是您所看到的这一版青天指南的前身。也是在 2016 年，时隔五年，学会再次启动主题为“凿通西南”的社会实践。实践团走访了建设接近尾声的五百米口径球面射电望远镜，抚仙湖观测站的 NVST 望远镜，高美古观测站的 2.4 米望远镜以及西昌卫星发射中心，饱览了中国天文学与航天的新成就。



图 10.5 2016 年西南社会实践

2018 年，在拉卡拉社团发展基金的资助下，学会筹拍了《未闻星名——北大天文宣传片》。宣传片的导演、编剧、主演，绝大部分是有学会骨干担任的。宣传片的各个制作流程都有学会骨干的参与。这部宣传片现在已经成为外界了解学会以及北大天文系的一扇窗。

2019 年至今，学会仍然坚持以活动为核心，以科普为导向，以热爱为动力。观测方面，学会以静园草坪例行观测和京郊外出观测为主线，以特殊天象观测为补充；学术方面，建立了系列科普讲座、天文沙龙、天体物理小组等由浅入深的多层次科普和学术活动体系。这一时期，在拉卡拉社团发展基金资助下，学会的装备也大大丰富，先后购买了 12 寸 DOB 望远镜、200 mm “大黑”望远镜、C11HD 折反望远镜、日珥镜以及赤道仪、行星相机等多种装备，装备之齐全在北京高校天文社团中首屈一指。学会同时购买了云南丽江和智利的远程天文台机时。依托这些设备，学会开展了一系列观测和摄影活动，产出了许多精美的摄影作品，并进行了天文摄影教学活动。我们始终积极探索学会的发展道路，在成就和曲折中不断前行。

2020 年疫情期间，学会迎来了 30 岁生日，往届会长和骨干们以及全国高校各天文社团纷纷发来祝福。燕园的星空依旧璀璨，未闻星名的我们，依旧在迈向星河的路上，期待着与你的相逢。

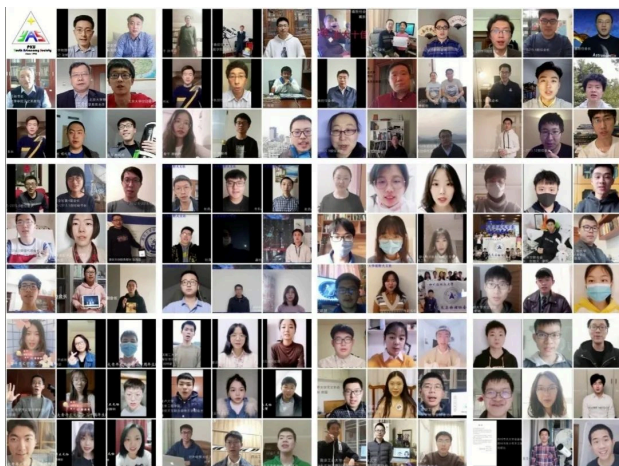


图 10.6 2020 年 30 周年会庆祝福视频

插图目录

1.1	长时间曝光后得到的星空图像(星轨)	2
1.2	天球与地球	3
1.3	赤道坐标系的坐标表示	4
1.4	英仙座的神话想象图和实际的星图	5
1.5	黄道经过蛇夫座、人马座和天蝎座示意图	6
1.6	太阳系示意图	8
1.7	月相示意图	9
1.8	地平坐标系	17
1.9	北天极高度与地理纬度的关系	18
1.10	地平-赤道坐标系	18
1.11	北极、赤道和中纬度地区下天体的周日视运动	19
1.12	太阳的周年视运动	19
1.13	四季星空的变化	20
1.14	黄道坐标系示意图	20
1.15	黄道示意图	21
2.1	日行迹	24
2.2	世界时区图	26
2.3	浑仪实物图	34
2.4	浑仪原理图	35
2.5	各种时标的关系	41
2.6	简仪实物图	43
2.7	简仪原理图	44
2.8	北京古观象台的天体仪(即浑象)、赤道经纬仪、黄道经纬仪、地平经仪、 象限仪、纪限仪,图片选自南怀仁《新制灵台仪象图》。	45

2.9 纪限仪实物图	45
2.10 纪限仪原理图	45
2.11 纪限仪枢轴系统	45
2.12 纪限仪的弧与窥衡	46
2.13 纪限仪的刻度	46
3.1 一种折射式望远镜	48
3.2 一种采用复消色差结构的折射式望远镜光学原理。其使用了三片透镜 和高级玻璃(首片为低色散玻璃,后两片为火石玻璃)	48
3.3 一种牛顿式反射望远镜	48
3.4 牛顿式反射镜光学原理。其主镜为抛物面镜,可以很好地将光线汇聚到 一点	49
3.5 哈勃望远镜的光学原理。采用了卡塞格林式反射镜	49
3.6 一种施密特-卡塞格林式望远镜	50
3.7 施密特-卡塞格林式望远镜。图中前端为施密特改正镜	50
3.8 一种马克苏托夫-卡塞格林式望远镜	50
3.9 马克苏托夫-卡塞格林式望远镜。其中最前端为弯月镜	50
3.10 地平式支架的原理	53
3.11 经纬台	53
3.12 道布森支架和望远镜	53
3.13 赤道仪原理	54
3.14 德式赤道仪	54
3.15 中央平衡式赤道仪	54
3.16 同时拥有地平式和赤道式两种工作模式的 Sky-Watcher AZ-EQ6 支架 ...	55
3.17 目镜	56
3.18 普通天顶镜	57
3.19 全正像天顶镜	57
3.20 巴罗镜	57
3.21 巴罗镜原理。其中 B 表示巴罗镜	57
3.22 巴德膜	57
3.23 日珥镜	58
3.24 日珥镜原理	59
3.25 挑选望远镜流程图	60
3.26 保罗双筒望远镜	62

3.27 保罗双筒望远镜光学图	62
3.28 屋脊双筒望远镜	62
3.29 施密特·别汉棱镜光学图	62
3.30 阿贝·柯尼希棱镜光学图	62
3.31 色差示意图	66
3.32 球差示意图。图片来源见水印	66
3.33 彗差示意图	67
3.34 像散示意图	67
3.35 场曲示意图	68
3.36 畸变示意图	68
4.1 太阳结构示意图	70
4.2 太阳黑子	72
4.3 日珥	72
4.4 福州一中的同学利用投影板观察日环食	73
4.5 日面上的暗条	73
4.6 阿波罗 8 号在月球轨道上拍摄的地月合影	74
4.7 火星逆行示意图	76
4.8 地内行星相对太阳视运动示意图	77
4.9 地外行星相对太阳视运动示意图	77
4.10 2012 年的金星凌日。图片来源:Wikipedia	78
4.11 水星假彩色影像	79
4.12 水星的自转和公转示意图。图片来源:Wikipedia	80
4.13 信使号拍摄的水星拉赫玛尼诺夫环形山照片。图片来源:NASA	80
4.14 水手 10 号拍摄到的金星(紫外和可见波段叠加)。图片来源:NASA	81
4.15 明亮的金星,在水面上投射出了迷人的倒影。图片来源:NASA	81
4.16 1982 年金星 13 号着陆器拍摄的金星地面照片。图片来源:Wikipedia	82
4.17 根据麦哲伦号探测器的雷达数据绘制的金星地貌。图片来源:NASA	83
4.18 2004 年上半年金星相位的变化情况。图片来源:Wikipedia	83
4.19 火星的假彩色地形图,明显可见南半球的平均地势较高。图中中间靠 左的裂缝状结构是水手大峡谷,左侧靠近北纬 20° 线的山峰是奥林波斯 山。图片来源:Wikipedia	84
4.20 火星北极附近科罗廖夫环形山内积累的大量水冰。图片来源:ESA	84
4.21 火星日环食	85

4.22	香港著名天文爱好者刘佳能所拍摄的 7 次火星冲日的影像	86
4.23	木卫一 Io 影凌木星	87
4.24	木星的四颗伽利略卫星	88
4.25	一般的望远镜中木星及其卫星应该呈现的样子	88
4.26	利用 22 英寸望远镜拍摄的土星, 可以看到最粗的卡西尼缝、外缘的恩克缝、纱环(注意土星主体下侧靠近环处)和北极处的六边形风暴。图片来源:Jack、坐照(牧夫天文论坛)	89
4.27	土星环的主要分区。图片来源:Wikipedia	89
4.28	天王星和海王星	91
4.29	新视野号探测器拍摄的冥王星。图片来源:NASA	93
4.30	小行星带	94
4.31	彗星 C/2014Q2 (Lovejoy)	94
5.1	日食的成因	96
5.2	月食的成因	96
5.3	日食的过程。其中阴影表示月影。	97
5.4	月食的过程	98
5.5	新智慧星 C/2020 F3 (NEOWISE), 图中可见一条尘埃彗尾和两条离子彗尾。图片来源:APOD	99
5.6	流星成因示意图	101
5.7	英仙座流星雨。图为不同时间多颗流星叠加而成。图片来源:APOD	101
5.8	2020 年双子座流星雨 ZHR 图示	102
5.9	天宫号空间站过境星图	104
6.1	恒星的光谱型序列(哈佛分类法)	111
6.2	赫罗图	113
6.3	质光关系	113
6.4	恒星内部的氢聚变	116
6.5	比结合能曲线	117
6.6	恒星核心区的“洋葱状结构”	117
6.7	星际云坍缩, 碎裂形成恒星的过程	119
6.8	早期红巨星壳层氢聚变图	120
6.9	启动氦聚变	120
6.10	双层燃烧	121

6.11 氮单层燃烧	121
6.12 AGB 分支内的恒星	122
6.13 行星状星云与白矮星	122
6.14 天狼星于 1793 年到 1880 年间的螺旋式自行	125
6.15 钱德拉 X 射线天文台拍摄的天狼星 A 与天狼星 B	125
6.16 白矮星半径-质量关系	126
6.17 描述中子星内部结构的不同模型	128
6.18 黑洞视界望远镜拍摄的 M87 星系中心超大质量黑洞的图像	130
6.19 钱德拉 X 射线天文台拍摄的天鹅座 X-1	130
6.20 哈勃空间望远镜拍摄的勾陈一	132
6.21 造父一的周期性光变曲线	134
6.22 单位弧度	136
6.23 平面角	137
6.24 立体角	137
6.25 相对视见函数	137
6.26 钠的发射光谱与吸收光谱示意图	140
6.27 在大气层之上和海平面处的太阳辐照度光谱	141
6.28 原子核	142
6.29 黑洞视界与能层的示意图	147
7.1 蟹状星云(M1)	150
7.2 全部的梅西耶天体	151
7.3 昴星团(M45)和武仙座球状星团(M13)	152
7.4 球状星团 M75 和 Palomar 12	153
7.5 加利福尼亚星云(NGC 1499,发射星云)和马头星云(暗星云)	155
7.6 猎户座大星云(M42,弥漫星云)、指环星云(M57,行星状星云)和面纱 星云(NGC 6960,超新星遗迹)	156
7.7 哈勃星系分类法示意图	158
7.8 室女 A 星系(M87,椭圆星系)、仙女座大星系(M31,旋涡星系)、南风车 星系(M83,棒旋星系)和雪茄星系(M82,不规则星系)	159
7.9 相互作用星系 NGC 4038 和 NGC 4039	160
7.10 类星体 3C 273	160
7.11 银河系剖面的示意图	160
7.12 银河系结构示意图	161

7.13 室女座星系团	163
7.14 近邻宇宙中的超星系团结构	164
7.15 斯隆数字化巡天(SDSS)发布的大尺度结构	165
7.16 哈勃定律的拟合:星系的退行速度与距离大致成正比	166
7.17 Planck 卫星探测到的宇宙微波背景辐射	166
7.18 今天宇宙的组成成分	167
7.19 宇宙演化史图示	168
8.1 两种火箭的尾焰	173
8.2 液体火箭与固体火箭的结构简图	174
8.3 世界知名火箭(①~④)	176
8.4 世界知名火箭(⑤~⑦)	177
8.5 中国长征系列运载火箭图谱	177
8.6 哈勃空间望远镜	179
8.7 哈勃极深场	179
8.8 马斯克的“杰作”	180
8.9 海王星上的卷云	181
8.10 旅行者 1 号拍摄的木星大红斑	181
8.11 在地面测试阶段的伽利略号	182
8.12 卡西尼号经典摄影作品: <i>The Day the Earth Smiled</i>	183
8.13 惠更斯号拍摄的土卫六地表	183
8.14 好奇号火星车经典角度的自拍	184
8.15 机智号火星直升机	184
8.16 嫦娥二号拍摄的图塔蒂斯小行星间隔成像照片	184
8.17 嫦娥四号	185
8.18 玉兔二号月球车的影子	185
8.19 祝融号传回的火星影像	186
8.20 世界第一次载人飞行任务,尤里·加加林在“东方一号”舱内的照片。	186
8.21 美国第一次载人航天任务,阿伦·谢泼德升空瞬间。	187
8.22 冯布劳恩(Wernher von Braun)与土星五号巨大的 F1 发动机合影	188
8.23 阿波罗 11 号指令与服务舱和登月舱分离时两舱互拍照片	188
8.24 尼尔·阿姆斯特朗拍摄的巴兹·奥尔德林在月球上的照片	189
8.25 阿姆斯特朗使用哈苏相机拍摄的奥尔德林、被动地震实验仪和登月舱	189
8.26 哥伦比亚号 STS-1 任务首秀	191

8.27 STS-82 任务宇航员站在机械臂上维修哈勃太空望远镜	191
8.28 挑战者号航天飞机发射阶段爆炸	191
8.29 哥伦比亚号航天飞机再入大气层时解体	191
8.30 国际空间站	192
8.31 STS-116 任务的宇航员进行太空行走,安装桁架有关设备	193
8.32 2021 年 7 月 29 日拍摄的“崭新”科学号实验舱	193
8.33 地面的火苗与国际空间站的火苗对比	193
8.34 天和核心舱地面测试与发射	194
8.35 神舟 12 号航天员在我国空间站拍摄的地球。图片来源见水印。	195
8.36 N1 火箭	196
8.37 “能源号”运载火箭发射“暴风雪号”航天飞机史诗般的场景	198
8.38 Skylab 2 机组成员离开时拍摄的战果——遮阳伞与展开的太阳能板	199
8.39 和平号空间站	199
10.1 1993 年北京天文台李竞老师作以“超新星”为主题的讲座	211
10.2 1995 年天文科普周的日食观测	212
10.3 2002 年北大清华天文知识竞赛	213
10.4 2010 年的全国天文社团发展论坛	214
10.5 2016 年西南社会实践	215
10.6 2020 年 30 周年会庆祝福视频	216



封面设计：包涛尼

分类建议：科普 / 天文

联系我们：pkuyas@126.com



扫描二维码关注

青年天文学会微信公众号