

# 目录

<b>第一章 星空导览</b>	<b>1</b>
§1. 夜空概述 .....	1
§2. 天球与星座 .....	2
§3. 恒星的命名与亮度 .....	6
§4. 如何观星 .....	9
§5. 如何阅读星图 .....	10
§6. 太阳系内天体 .....	11
§7. 天体的方位与度量 .....	11
补充阅读 .....	14
<b>第二章 天文望远镜</b>	<b>15</b>
<b>第三章 太阳系</b>	<b>17</b>
§1. 太阳系概述 .....	17
§2. 太阳 .....	18
§3. 月亮 .....	21
§4. 行星及卫星 .....	24
§5. 太阳系其他天体 .....	34
补充阅读 .....	36
<b>第四章 特殊天象</b>	<b>37</b>
§1. 日食与月食 .....	37
§2. 彗星 .....	39
§3. 流星雨 .....	41
§4. 人造卫星 .....	44

<b>第五章 恒星</b>	<b>49</b>
<b>第六章 时间、历法与星空文化</b>	<b>51</b>
§1. 时间与计时系统 .....	51
§2. 历法 .....	55
§3. 中国古代天文学简说 .....	60
§4. 希腊神话中的星座 .....	64
补充阅读 .....	68
<b>第七章 深空天体</b>	<b>73</b>
§1. 深空天体及其业余观测 .....	73
§2. 深空天体的编号及梅西耶天体 .....	74
§3. 星团 .....	75
§4. 星云 .....	77
§5. 星系 .....	80
§6. 宇宙* .....	84
补充阅读 .....	92
<b>第八章 太空探索</b>	<b>95</b>
§1. 序言 .....	95
§2. 火箭及其他航天器 .....	95
§3. 人造地球卫星 .....	100
§4. 太阳系探测器 .....	102
§5. 载人航天 .....	107
<b>第九章 资源</b>	<b>121</b>
§1. 天文读物和观测指南 .....	121
§2. 星图相关 .....	123
§3. 杂志 .....	124
§4. 软件和手机 APP .....	124
§5. 网络资源 .....	125
§6. 公众设施 .....	126
§7. 北京附近的观测地 .....	126
<b>第十章 青年天文学会简介*</b>	<b>129</b>

§1. 基本情况 .....	129
§2. 发展历程 .....	129
§3. 活动介绍 .....	134



# 第一章 星空导览

天文爱好者在接触天文时，首先要接触的就是我们头顶这一整片星空。按照我们从“看什么”再到“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，你可能会看见什么？

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

其次，你有可能会看见明亮的月亮。之所以是可能，是因为要考虑到月亮的相位。关于月亮的观测细节，我们会在后文提到。

夜空的主角，或许是闪闪发亮的恒星，它们的亮度和在天空中的相对位置基本是固定的，组成了一个个固定的形状，古人根据这些形状，命名了诸多星座，演绎了不少星座神话。

夜空的又一大主角是太阳系的行星们，它们看起来与恒星最大的区别是“行”，即行星在天空中有着非常明显的位置变化。行星虽然自身不发光、只反射太阳光，但是由于距离地球很近，所以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，它们于偶然间出现，又转瞬即逝，往往给仰望的人群留下一声惊叹；比如彗星，大彗星是非常罕见而又壮丽的天象，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C/2019 Y4(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——由于太阳巨大的引力作用，阿特拉斯彗星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天空中匀速而缓慢飞过

---

<sup>①</sup> 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”，感兴趣的朋友可以深入了解。

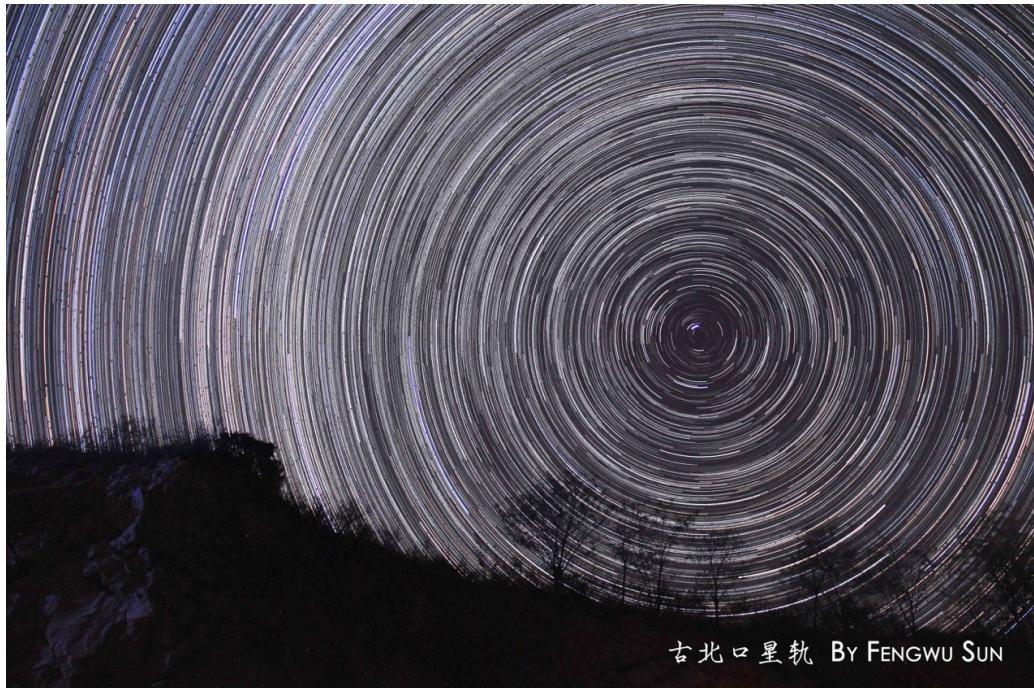


图 1.1 长时间曝光后得到的星空图像（星轨）。可以看出，夜空中的星星似乎都围绕着同一个点旋转，这就是所谓的“周日视运动”现象——这是因为地球自转引起了星星的东升西落。图片来源：北大青天会。

的人造卫星，如国际空间站和 2021 年发射升空的中国空间站天和核心舱<sup>①</sup>；同时，飞机、鸟儿、风筝、孔明灯也偶尔也会来捣乱，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。

在足够黑暗的夜空和合适的时间，你还会在天空中看到一条浅浅的银河，这就是我们太阳所身处的星系，一般来说，夏季夜晚中看到的银河最为明亮壮阔，在极其良好的天气下，你甚至可以在夏夜的未名湖边听着蛙鸣，欣赏天空中浅浅的银河；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”的观测细节将在后文中提到。

## §2. 天球与星座

在我们认识恒星与星座之前，我们需要了解什么是天球。也许这一部分比你想象得要艰难，但是如果不懂得天球，你只能停留在“看热闹”的阶段，难以按照自己的想法进行一次观测实践——如果不知道什么是天球，望远镜你都很难学会使用……

<sup>①</sup> 天和舱过境预测：<https://heavens-above.com/PassSummary.aspx?satid=48274>。

为什么要有天球这个概念呢？因为我们需要描述天体的位置，用于研究或交流。“天似穹庐，笼盖四野”——我们通常看到的天体离我们都太远了，以至于在我们描述它们位置的时候，完全可以不管距离（认为是无穷远就好），而只顾方向——这样，我们就可以认为天体们散布（严谨的说法是“投影”）在以观测者为球心，半径无穷大的球面上，这也就是天球。我们需要用角度描述天球上两个物体的距离（而非线尺寸），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——地球上有诸多相对位置不动的城市，它们的海拔在地球仪上无关紧要；天球上也有诸多相对位置不动的恒星（其实它们也在动，但是动得很小，几乎无法察觉），它们的距离在天球坐标系中也是无关紧要的东西——也就是说，天球上的恒星，地位可以对应于地球上的城市。

**天轴与天极** 如果你学过高中地理，你应当知道，地球的地轴指向在空间是固定的（实际上地轴有一个周期约两万六千年的摆动，这个摆动造成了岁差现象；但这个周期比起人的寿命而言显然长了太多）；因而，天球的天轴的选取，可以自然地与地轴平行——这样，天轴与天球的两个交点就自然的被称为南、北天极，就像地球的南极、北极一样。

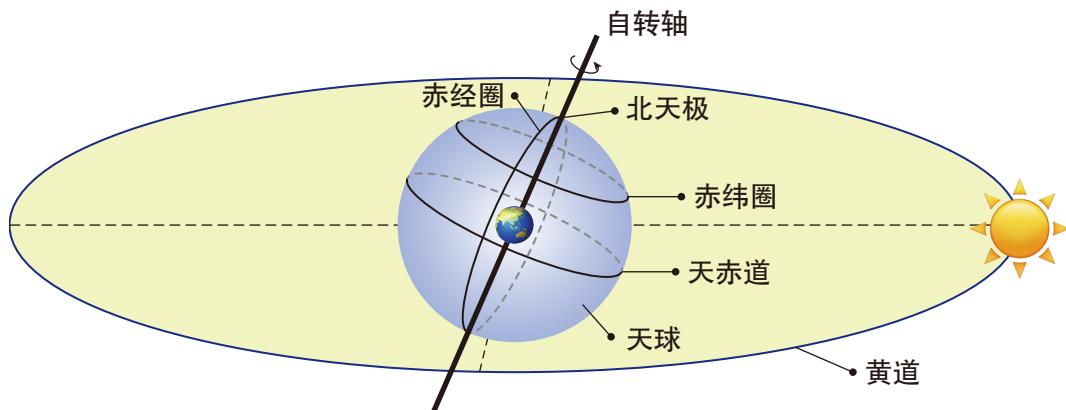


图 1.2 天球与地球

**坐标表示** 地球上有赤道，有经线圈，纬线圈，相信这些东西你都可以轻易在地球仪上找到，此时，经度纬度可以用来描述地球上任意一点的位置；在天球上，为了描述恒星的位置（方向），也有对应的天赤道（这相当于地球上赤道经过无限扩展后，在天球上的投影）；此时的经度叫做赤经（Right Ascension，记作  $\alpha$ ，按图中所示方向度量为正），此时的纬度叫做赤纬（Declination，记作  $\delta$ ，向北度量为正）。在记录恒

星位置的星图（相当于天上的地图）上，你可以根据恒星的经纬坐标，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，其基本大圆<sup>①</sup>就是天赤道，而坐标系的基点是春分点<sup>②</sup>。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  $18^{\text{h}}37^{\text{min}}$ （赤道坐标系中，赤经范围为  $0 \sim 24^{\text{h}}$ ，对应着  $0 \sim 360^{\circ}$ ），赤纬为  $38^{\circ}47'$ 。

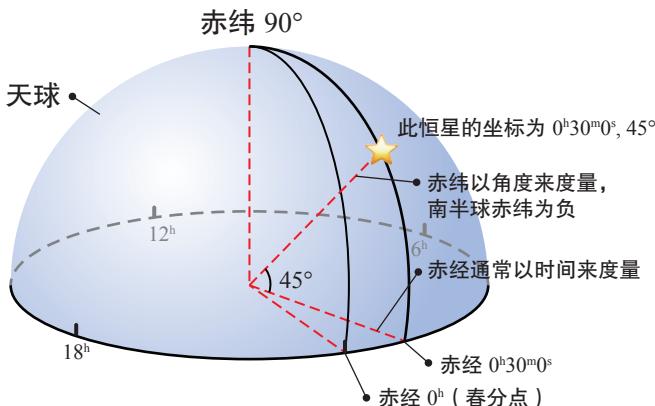


图 1.3 赤道坐标系的坐标表示

有了天球的初步概念之后，我们先来解决星座划分的问题。可能很多同学认识星空都是由占星学（Astrology）开始，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“天空中有多少个星座”这个问题的时候，不少人的回答都是 12 个，而正确的回答却是 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（当然实际上大部分一点也不像）；为认星方便，人们用线条连接亮星形成各种图形，在图形的基础上，把星空划成若干恒星的组合，每个组合叫做一个星座，它们大小、形状不一，分别以图形近似的动物、器物等命名。当然还有星座是根据神话故事命名的，比如英仙座（Perseus）象征的是希腊神话的英雄珀尔修斯，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** 星座的划分依据，在于这些星在天空中处在大致同一个方向。严谨地说，“星座是天球上的一个区域”。也就是说，同一星座中的恒星，距离地球的距离可以大不相同，可能实际上相距很远，没有任何物理联系。一个星座里不

① 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），纬线圈中只有赤道是大圆。在球坐标系中，与轴垂直的大圆就是基本大圆。

② “基点”代表的含义是，这一点坐标可以写作  $(0, 0)$ 。春分点的含义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。

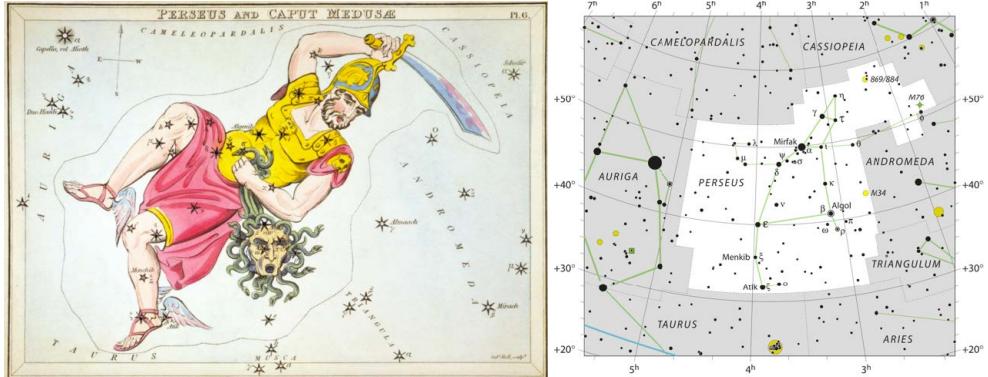


图 1.4 英仙座的神话想象图和实际的星图，读者觉得古希腊人的脑洞如何？图片来源：Wikipedia。

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，由于不同民族文化的的不同，各不相同的星座划分方式也就出现了：我国古代有“三垣四象二十八宿”的天区划分，可以说人们在夜空中勾画出了天上的宫殿。在西方古代，星座起源于古巴比伦；后来，托勒密编制出了 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<sup>①</sup>。

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<sup>②</sup>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，意思就是说，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，太阳已经位于金牛宫；而当今天的太阳运行到金牛座

<sup>①</sup> 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 4D 动图：[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Astro\\_4D\\_uma\\_rg\\_anim.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Astro_4D_uma_rg_anim.gif)

<sup>②</sup> 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。

时，太阳已经位于双子宫。并且，黄经过的天区其实有 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。

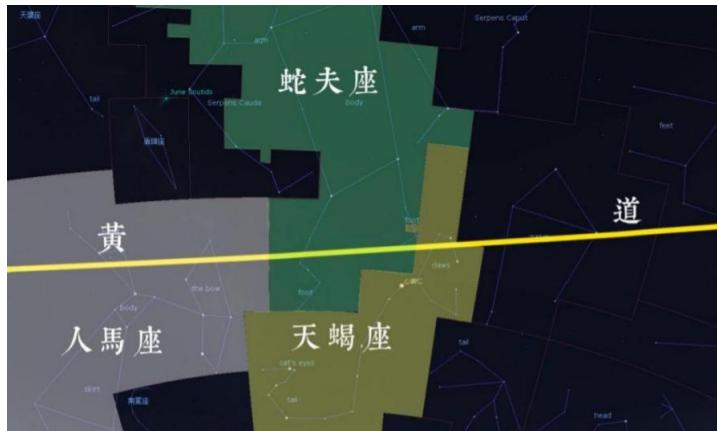


图 1.5 黄道经过蛇夫座、人马座和天蝎座示意图

需要指出的是，作为天文爱好者，我们旗帜鲜明地认为，占星学是一门伪科学，利用十二星宫的概念对人进行归类与占卜带有着显而易见的偏见和荒谬<sup>①</sup>。

实际上，黄道经过的天区有 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；同时，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），星座的位置也有一些后移——这一天文现象的结果是，21 世纪的星座位置已经与星宫对应不上了。当今天的太阳运行到白羊座时，按占星学的划分，太阳已经位于金牛宫；而今天的太阳运行到金牛座时，太阳已经位于双子宫。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

为了指认和交流的方便，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，很多明亮的恒星会有不少惯称：比如位于北天极附近的北极星（Polaris），比如全天最明亮的恒星天狼星（Sirius），比如织女星（Vega）。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赤道仪的数据库和国外天文爱好者交流。

<sup>①</sup> 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/>。

**2. 中国古代命名** 中国古星官（其实西方的星座也一样）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字。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，你可以称之为北斗一、北斗二，直到北斗七；对应地，它们也可以被称为天枢、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，在我们经常使用的简写模式下，其中的“门牌号”是星座的拉丁缩写，比如室女座 (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，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<sup>①</sup>，不用希腊字母表示的恒星普遍很暗。

例如，北极星被记作  $\alpha$  UMi (小熊座  $\alpha$ )，我们之前提到的大陵五被记作  $\beta$  Per (英仙座  $\beta$ )。但是也有例外，比如猎户  $\alpha$  [ 参宿 (shēnxiù) 四， $\alpha$  Ori ] 其实是比  $\beta$  (参宿七) 暗的（有可能是古人看的时候不仔细，也有可能是星的亮度有所改变）。这种方法的用途最为广泛，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的研究的需要，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](https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_designation)。

我们再来谈谈恒星（乃至其他天体）的亮度。亮度显然应当定量来描述。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

<sup>①</sup> 这种排序规则有不少例外情况，比如猎户座  $\alpha$  (参宿四， $\alpha$  Ori) 其实是比  $\beta$  (参宿七) 暗的；有一些星座甚至没有  $\alpha$  星，比如小狮座 (Leo Minor)。

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  $\sqrt{100}$  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，织女星为 0 等（在一些天文学家使用的标准中，织女星甚至被严格定义为 0 等），金星一般约为 -4 等，夜空中最亮的恒星为 -1.4 等的天狼星，北极星是 2 等，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 ~ 11 等的恒星。

图 1.6 给出了一些常见天体的亮度。



图 1.6 常见天体的亮度。图片来自 <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-resource/s/the-stellar-magnitude-system/>

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 32.6 光年（10 秒差距<sup>①</sup>）远的地方，此时它的亮度（视星等）就是它的绝对星等。

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

<sup>①</sup> 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。

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. 如何观星

在我们已经对天球、星座、恒星有一个初步的认识之后，我们就可以利用我们学到的知识，投入到观测实践当中——这样，你才可以告别“瞎看”，而是像一个天文爱好者一样审视你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：观测需要有哪些条件？

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，你要有一个晴朗的夜晚。**这或许应当是你参加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。<sup>①</sup>

北京的晴天相对不少，但是影响我们观测的还有厚重而深沉的那故都的霾。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，照得地面上你都能看到自己的影子，你还能指望看到多暗的天体呢？因此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。关于月相的细节，在本书第四章有更详细的说明。

说完了天时，再来说说地利。选择观测地点，首先当然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。**减少光污染，一般只能是离城市越远越好；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，比较容易就能看到银河。

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）<sup>②</sup>，在此我们不过多阐述。

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：

<sup>①</sup> 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。

<sup>②</sup> 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，大气约“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。

**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——你可以在地席或者躺椅上观测，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，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<sup>①</sup>。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；
- 尽量不要在他人相机前经过，更不要停留，除非确认没有在拍摄；
- 尽量不要使用指星笔

**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，你永远会觉得温暖。建议使用睡袋、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。

## §5. 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为方便不过的，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？首先我们要知道一点，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。

---

<sup>①</sup> 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]》。这里面的很多内容都值得大家学习：<https://bbs.pku.edu.cn/v2/post-read-single.php?bid=89&type=0&postid=14241631>

## §6. 太阳系内天体

太阳系内的天体，由于位置每年的变动较大，不会在纸质版的全天星图中印刷出来，但是可以用星空模拟软件如 Stellarium 等模拟其位置；手机端可以使用星图、StarWalker 2 等软件实时查看夜空中的行星位置。

太阳系内常被目视或小口径望远镜观测的天体主要有太阳、月亮、行星、卫星、彗星、流星、人造卫星等。**使用望远镜观测太阳时必须使用巴德膜！<sup>①</sup>**

业余观测中，太阳主要看点是太阳黑子、日珥、米粒组织等，其中太阳黑子的观测较为容易；此外，地内行星（水星、金星）可能会发生凌日，这是一种较为罕见的日间天象，具体内容见本书第三章《太阳系》。

对月球的业余观测，主要侧重于其表面细节，如月海、环形山等，见第三章《太阳系》；日月食是太阳和月亮最常发生的特殊天象，其原理和预报见第四章《特殊天象》；对行星、卫星、人造卫星、彗星、流星（雨）的观测见第三章《太阳系》与第四章《特殊天象》。

## §7. 天体的方位与度量

如何知道在你打算观测的时候，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，我们不该在这里大谈特谈应该如何计算——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六章《资源》中了解到。我们来定性地讨论这个问题：

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。

**地平坐标系的引入** 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；而基点一般是南点（也有取北点的情况）。

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  $-90^\circ$  到  $90^\circ$ ；而方位角  $A$  一般从南点  $S$  起算，顺时针测量，范围从  $0^\circ \sim 360^\circ$ 。另外，在特定的情形下，天文学

<sup>①</sup> 巴德膜是一种滤光设备，可以有效保护眼睛，如果不使用巴德膜观测太阳，可能会导致双目失明。

家也常用天顶距  $z$  来代替  $h$ ，同一天体的天顶距和地平高度之和显然是  $90^\circ$ 。

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——你需要同时调整方位角和高度角，才能跟踪天体运动；而这种跟踪，也会引入场旋。

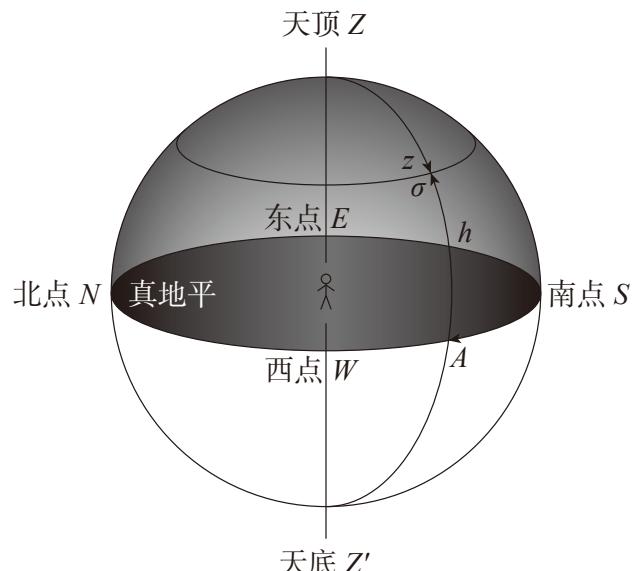


图 1.7 地平坐标系。图片来源：《基础天文学》。

**地平-赤道坐标系** 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？看图：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  $\angle O'Q'$ ；在地球上任何一点去看，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  $\angle P'OE'$  应该和你的地理纬度一致！

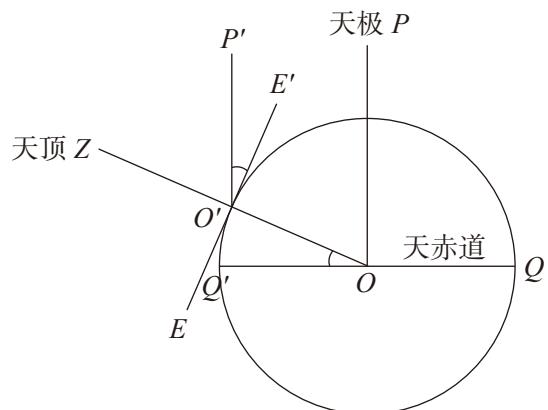


图 1.8 北天极高度与地理纬度的关系。图片来源：《基础天文学》。

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糅合在一起了。

继续看图：图 1.9 就代表着实际观测时的情形。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。天轴的方向始终不变，整个天球就绕着天轴慢慢旋转，23 小时 56 分转一圈<sup>①</sup>。

天体的赤道坐标（赤经  $\alpha$ 、赤纬  $\delta$ ）是与观测的时间和地点无关的<sup>②</sup>；而天体的高度和方位角，却跟着地理位置和时间在变化，这种运动规律叫做天体的周日视运动，说白了，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要长。

只有天赤道上的天体，才是正儿八经的东升西落，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 1.10 给出了三种情况下的天体周日视运动，分别是北极、赤道和中纬度。

至于天体方位的度量，你应当知道描述天体的方位，或者两个天体距离时，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  $1^\circ$ ，五指并拢约宽  $10^\circ$ ，五指张开约宽  $20^\circ$ 。

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

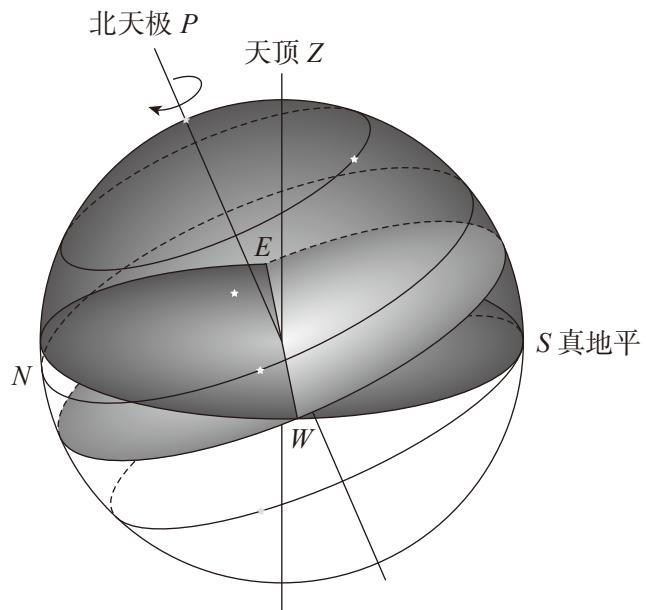


图 1.9 地平-赤道坐标系。图片来源：《基础天文学》。

<sup>①</sup> 这是一个高中地理知识，如果你想知道为何不是 24 小时，可以查阅有关“恒星日”“太阳日”的资料或阅读本书《时间、历法与星空文化》一章。

<sup>②</sup> 天球绕着天轴旋转，因而赤纬显然是和时间无关的，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）。

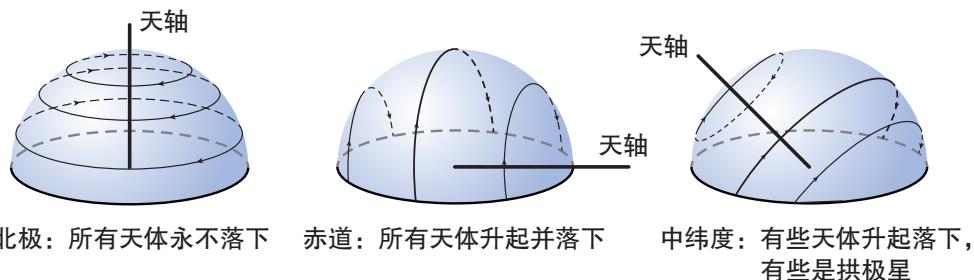


图 1.10 北极、赤道和中纬度下天体的周日视运动

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 $5^\circ$ ，北斗一和北斗三之间角距离约为 $10^\circ$ ，北斗一和北斗五之间角距离约为 $15^\circ$ ，北斗一和北斗六之间角距离约为 $20^\circ$ ，北斗一和北斗七之间角距离约为 $25^\circ$ 。

估测天体之间的角距离是一项天文爱好者的基本技能，希望读者在平时的观测实践当中掌握并应用之，相信你会察觉到其方便之处的。

## 补充阅读

### — 奥伯斯佯谬

## 第二章 天文望远镜



# 第三章 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 99.87%，其它所有天体均在太阳引力作用下绕之旋转。

除了太阳之外，余下的 0.13% 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<sup>①</sup>，在不断旋转中发生碰撞与融合，逐渐形成其它天体。

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。

---

<sup>①</sup> 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。

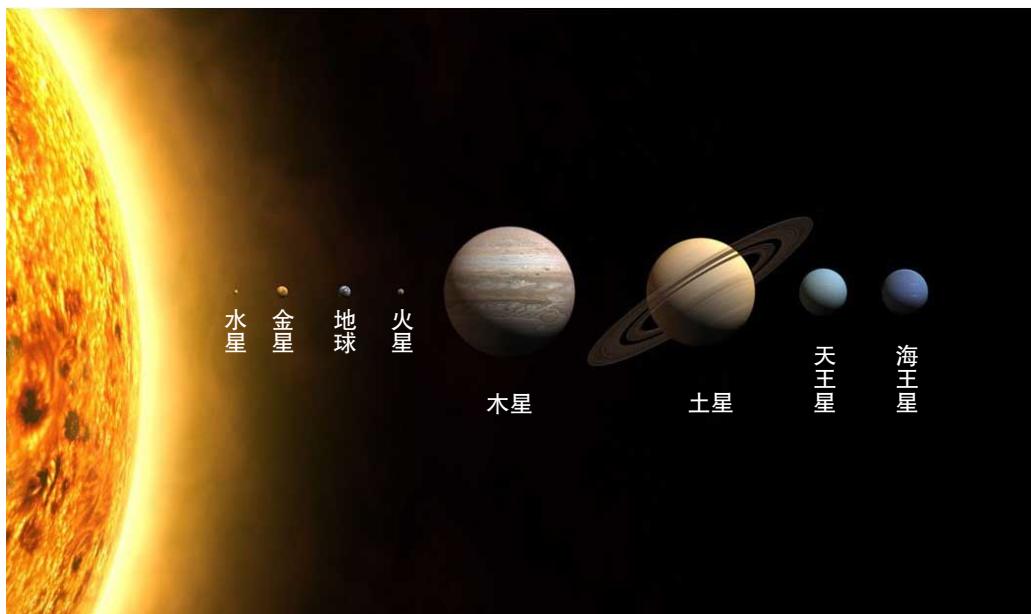


图 3.1 太阳系示意图。图片来源：Wikipedia。

## §2. 太阳

尽管本书是观测普及导向的，但我们仍然有必要先介绍一些基本的物理知识，再具体回答“看什么”和“怎么看”的问题——这应当是正确建立知识架构所必须的过程。一名优秀的天文爱好者也许不需要记住太阳核心的温度，如果您对物理不感兴趣，很多内容可以大段跳过。

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，表面温度约 5770 K<sup>①</sup>，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。

### 一 太阳的结构

太阳内部从内向外可分为核反应区、辐射区和对流区，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 1500 万开，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。

<sup>①</sup> 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 1 K 相当于升高 1°C，而 0°C 相当于 273.15 K——不了解的读者可以检索“热力学温标”，获得更详细的介绍。

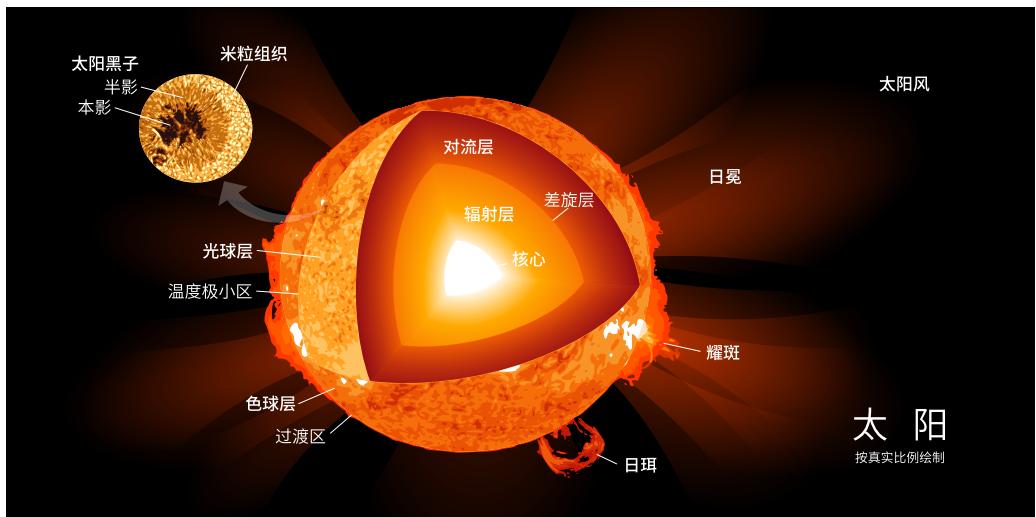


图 3.2 太阳结构示意图。图源：Wikipedia，青天会汉化。

**辐射区** 将核反应区的能量以光的形式向外传输，温度大大降低；

**对流区** 下降到 50 万开，因巨大温差产生的热对流得名。

**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 6000 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，故人们最早是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。

## 二 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。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。

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。

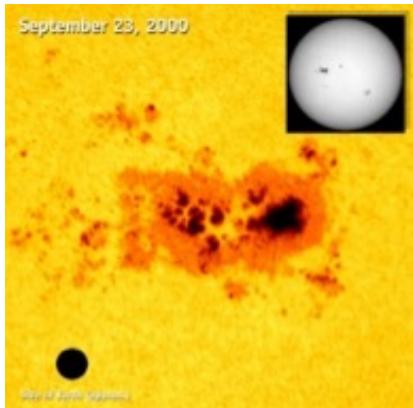


图 3.3 太阳黑子，左下角为地球的尺度比例。图片来源：[thesuntoday.org](http://thesuntoday.org)。

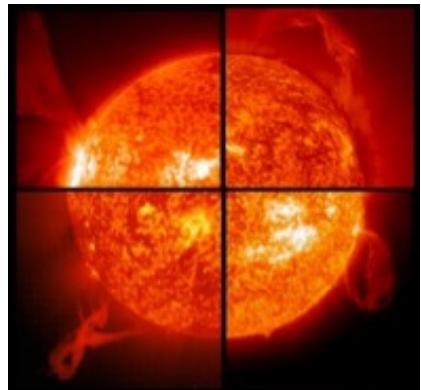


图 3.4 硕大的日珥，图片来源：[thesuntoday.org](http://thesuntoday.org)。

**日珥** (Prominence)：是发生在色球层的太阳活动——这也意味着我们在一般时间、利用一般的方法，无法对他进行观测。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。

### 三 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。这里特殊需要强调戴墨镜、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，巴德膜 (BaaderAstroSolar™SafetyFilm) 网上有售，价格不贵，读者可以参考第二章第 4 节，了解具体的操作。目视观测常用的巴德膜一般是密度 5.0 的；普通老百姓观察日食时的“日食眼镜”，也用到了这种东西。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。

**投影法** 在教学级别的天文台里很常用的方法，每年北大的基础天文课上都会组织同学们观测太阳黑子，用的就是这种方法。这种方法就是把望远镜当做相机镜头，把一块白色投影板当做底片，利用漫反射减光的原理，通过投影观察太阳表面。一般来说，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。



图 3.5 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。图片来源见右下角。

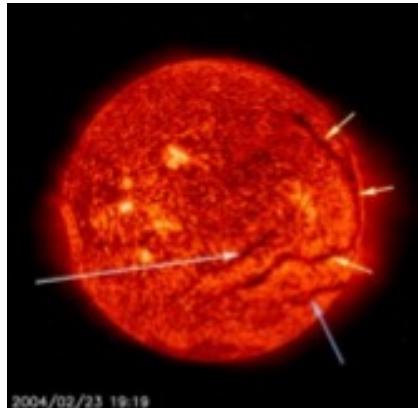


图 3.6 日面上的暗条，如箭头所示。图片来源：[thesuntoday.org](http://thesuntoday.org)。

**日珥镜** 在正常的望远镜前加装一块日珥镜，可以使得波长为 656.3 nm 的光透过，而其他波长的光都被反射走——这就起到了减光的作用；同时，透过的光携带着大量色球层的信息，因而我们可以通过日珥镜来观察色球层上的活动，包括日珥、暗条（filament）等细节。也许是业余太阳观测中最上档次的方法。

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）大约是 1.496 亿千米，这个单位在我们接下来的内容中会经常提到；② 太阳的角直径<sup>①</sup>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”，这是一个有关参照物的错觉。

## §3. 月亮

月亮是地球的卫星，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，作为业余天文中的重要观测目标，我们需要对月亮进行一些必要的介绍。

### 一 月相

所谓月相，就是月亮的“阴晴圆缺”状态；而月相的变化，取决于我们看月球的角度。

如图 3.7 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，取决于月亮的位置。

<sup>①</sup> 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。

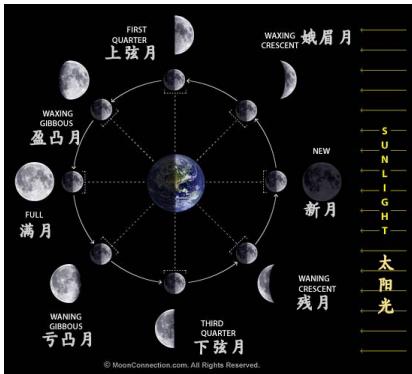


图 3.7 月相示意图

当月亮位于地球与太阳的中间时，亮面背对地球，我们看不见月亮，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——往后，月亮逆时针公转，先后经历图中位置：新月 → 峨眉月 → 上弦月 → 凸月 → 满月 → 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，前半周期的月亮是右边亮，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，这与阴历一个月的平均长度相同。值得注意的是，月亮绕地球真正的公转周期（恒星月）为 27.32 天，略短于朔望月——这是因为在月亮绕地球转的时候，地球也在绕太阳公转，两次朔之间月亮转过的角度要略大于  $360^\circ$ 。

月相对于天文观测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 -12 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，在观测月亮的时候，尽量选在上、下弦附近，这与摄影中“侧光”的概念类似——此时的月亮立体感较强，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。

## 二 月面特征

月亮是一个直径约为 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，月亮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<sup>①</sup>。因此，我们在地球上最多能看见月亮表面 60% 左右的区域。

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，月亮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。

月亮表面大片的暗处叫做月海 (lunarmare)，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)，

<sup>①</sup> 月球天平动示意动画：[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Lunar\\_libration\\_with\\_phase2.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Lunar_libration_with_phase2.gif)

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，月球上还有不少的峡谷（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，细节一样丰富的哥白尼环形山。

在本节的最后，我想引用这张阿波罗 8 号的照片（图 3.8）结束我们对月球的介绍。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 3.8 阿波罗 8 号在月球轨道上拍摄的地月合影

## §4. 行星及卫星

### 一 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：

- ① 不是卫星；
- ② 围绕于恒星运转（即公转）；
- ③ 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）；
- ④ 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，被归为矮行星<sup>①</sup>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，根据它们的轨道半径的大小，八大行星也可以分为“内行星”（水、金，只有二者轨道在地球轨道内）和“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天象，让大家初步了解行星运动规律，掌握“大距”“冲日”等概念，这对于您阅读之后的内容很有帮助。

### 二 行星天象

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

<sup>①</sup> 矮行星满足于行星定义的①、②、③，但不满足④。它们的质量介于行星和小行星之间。小行星只满足定义①、②。

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。

## 1 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3.9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相反方向，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。

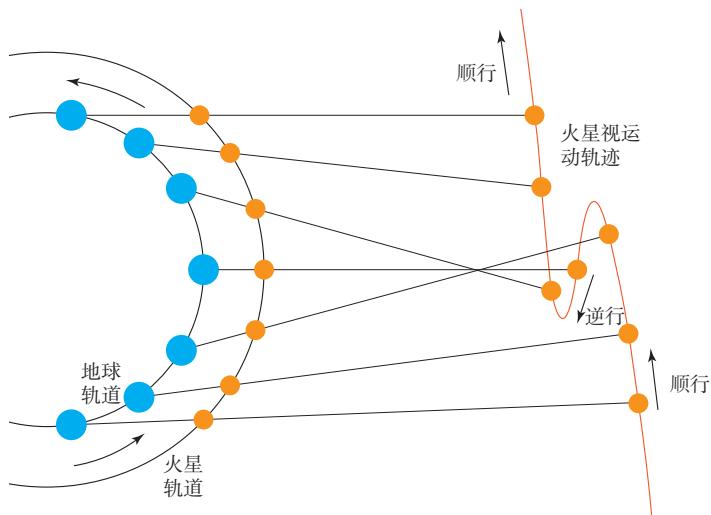


图 3.9 火星逆行示意

## 2 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 3.10 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，因而更不利于观测。<sup>①</sup>

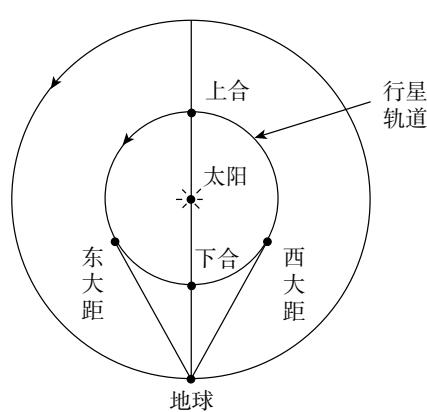


图 3.10 地内行星相对太阳视运动示意图

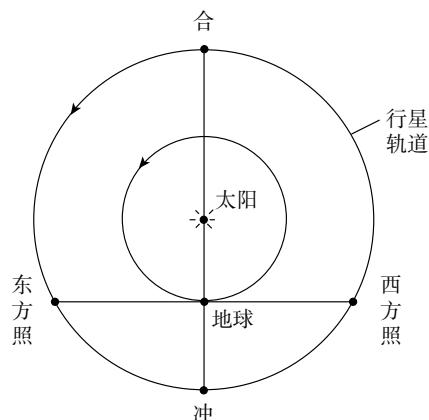


图 3.11 地外行星相对太阳视运动示意图

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

<sup>①</sup> 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，行星的地平高度较高。

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 3.12 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！

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3.11所示。合时，行星离地球最远，黄经与太阳相同；冲时，行星离地球最近，黄经与太阳黄经相差  $180^\circ$ ；东方照和西方照时黄经相差  $90^\circ$ 。对于地外行星来说，最佳观测时机是冲，此时地外行星离地球最近，因而看起来亮度也最高，而且整夜可见。由于地球和行星的轨道并非正圆，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计算：

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

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。

### 3 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<sup>①</sup>、行星和月球、恒星和月球的赤经<sup>②</sup>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。

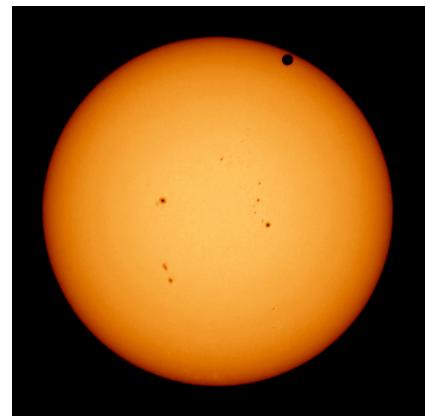


图 3.12 2012 年的金星凌日。图源：Wikipedia。

<sup>①</sup> 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。

<sup>②</sup> 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视赤经相同。

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。<sup>①</sup>

### 三 八大行星

#### 1 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，轨道周期是 88 地球日，从地球上看，它大约 116 天左右与地球会合一次，公转速度远远超过太阳系的其它星球。<sup>②</sup>

水星质量很小，约只有 0.055 个地球质量。它既没有卫星，也没有足够的引力维持住大气。因此水星没有水，表面温差变化极大，可以说，水星不适合任何生命居住。

水星的轨道半长轴<sup>③</sup>约 0.4 天文单位，因而它总出现在太阳的附近，与太阳角距最大只有  $28^\circ$ ，经常淹没在太阳光辉之中，即使在最有利条件下，人们也只能在日落后或日出前一两个小时内才能看到。

在大距（每年 6 至 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。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 3.13 水星假彩色影像。图片来源：NASA。



图 3.14 国外的天文爱好者利用 11 寸口径的望远镜拍摄到的“水牙”。图片来源：Sky&Telescope

① 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。

② 由开普勒第三定律可知，在太阳系中，更靠近太阳的行星公转速度更快，轨道周期更短。

③ 太阳系一切天体的轨道都不是完美的圆；对于行星而言，它们的轨道是离心率较小的椭圆——这也是开普勒行星运动第一定律的内容。因而，天文学家会用离心率、轨道半长径等术语来描述一颗行星的轨道。

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，而且在观测方向上的地平线附近不能有遮挡。在日落一段时间，你就有机会用肉眼或者望远镜找到它。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”——它的形成机理与月牙类似。

## 2 金星

金星是从太阳向外的第二颗行星，轨道半长轴约 0.72 天文单位，公转周期为 225 地球日，它也没有卫星。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。金星的体积和质量略小于地球，表面具有浓厚的二氧化碳大气，剧烈的温室效应导致金星大气温度极高，不适合生命居住。

金星是夜晚第二亮的天然天体（仅次于月球），视星等可以达到  $-4.7$  等。作为亮度的标杆，比金星还要明亮的流星被称为火流星（fireball）。由于金星是内行星，它距离太阳的最大角距离为  $48^\circ$ 。因此也只能在太阳出落前后的三个小时左右内看到。



图 3.15 明亮的金星，在水面上投射出了迷人的倒影。图片来源：NASA。

相信每个人都看见过金星，只是不见得每个人都能准确地辨认出来它。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 ( $10'' \sim 66''$ )，“金牙”会比“水牙”容易观测得多，甚至用双筒望远镜都有可能看得出来。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 3.16 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。

### 3 火星



图 3.16 2004 年上半年金星相位的变化情况。图片来源：Wikipeida。

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氧化铁。在太阳系的八大行星中，火星为第二小的行星，其直径约为地球的一半，自转轴倾角、自转周期则与地球相当，但绕太阳公转一周则需花费约 687 天。由于自身质量不够大，火星的大气非常稀薄，主要由二氧化碳构成。火星有两个天然卫星：火卫一 Phobos 和火卫二 Deimos，二者均很小且不规则，利用一般的望远镜很难观测到。

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，火星上没有生命，不过确实存在着水，但是数量上很有限，主要以水合物和水冰的形态存在，没有稳定的水体<sup>①</sup>。所谓殖民火星，以目前来看也是一个遥不可及的梦想。

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 1.6 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。

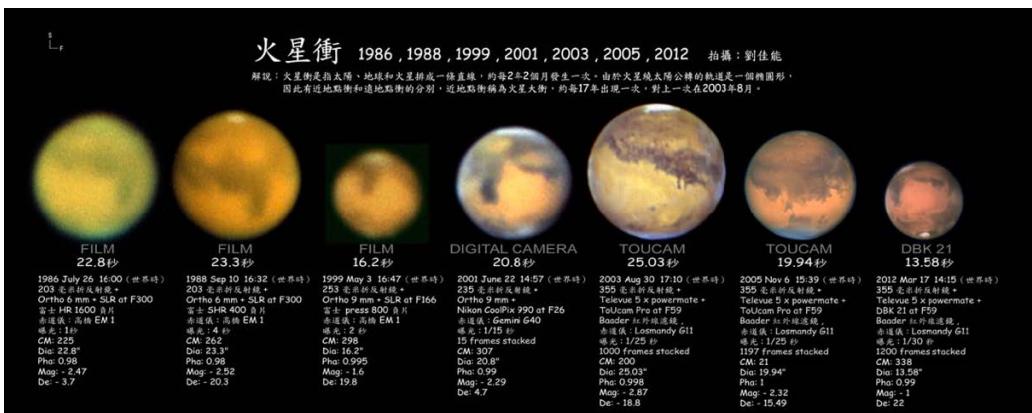


图 3.17 香港著名天文爱好者刘佳能所拍摄的 7 次火星冲日的影像，其中 1988、2003 年是大冲。从胶片时代，到千禧年前后的数码相机时代，再到后来的行星摄像头，这七张照片不仅见证了火星的运转，还见证了人类文明的进步——行星摄影的技术，始终前进在路上。图片来源：newcanon (牧夫天文论坛)。

① 详见 Wikipedia 的 Mars 词条。

观测火星一般选择在冲日前后（约两年一次）。肉眼看上去，火星只是一个明亮的小红点；利用望远镜，可以看到火星上的一些地面特征，比如两极的极冠（实际上是干冰），比如地面上的明暗。实际上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视宁度，也往往需要足够的观测技巧——这就需要读者反复地进行观测练习。

## 4 木星

木星是太阳系从太阳向外的第五颗行星，并且是最大的行星，因罗马神话中的众神之王朱庇特得名。它是一颗气态的巨行星，主要由氢构成，质量是太阳的千分之一，但却是太阳系其他行星质量总和的 2.5 倍。木星轨道半长轴为 5.2 天文单位，每 11.86 年绕太阳一周。

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，夜空平均第三亮的天体。木星的角直径最大可以达到 50”，最小也有 30”。

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，取其绕行天球一周为 12 年，与地支相同。古巴比伦人根据木星的轨道周期，定义了十二星宫。

截至本文最近一次修改，木星已被发现了 79 颗卫星，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，我们一般只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。这四颗卫星首先由伽利略发现，后来分别以宙斯的情人们命名。一般来说，用地面的望远镜很难分辨出这四颗卫星表面的细节。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。

一般来说，木星观测有以下几个看点。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：像五花肉一样的云带、硕大饱满的大红斑等都是木星上最吸引人的目标——如果想特意观测大红斑，最好提前查询红斑中天时间，在中天前后一小时内观察。进一步地，你甚至可以观察木卫的凌木、影凌。



图 3.18 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。



图 3.19 木星的四颗伽利略卫星（顺序：一二三四），图片来源：Wikipedia。



图 3.20 一般的望远镜中木星及其卫星应该呈现的样子，模拟软件：Stellarium。

## 5 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，因罗马神话中的农业之神萨图尔努斯得名。土星的轨道半长轴为 9.6 天文单位，约 29.7 年绕太阳一周。在中国古代，土星也被称为镇星。在肉眼看来，土星是一个 0 ~ 1 等的小黄点，其视直径约 15 ~ 20''。

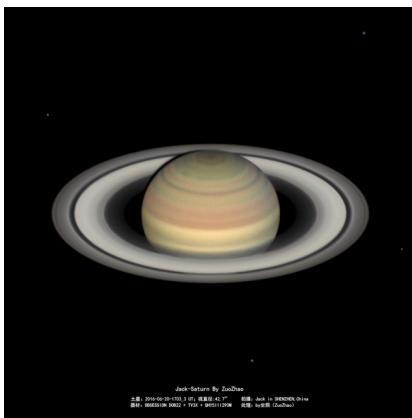


图 3.21 利用 22 寸镜拍摄的土星，土星环上最粗的环缝叫做卡西尼缝，外缘的环缝称为恩克缝。图片来源：Jack、坐照，牧夫天文论坛。

土星也是一颗气态的巨行星，主要由氢构成。土星有一个显著的环系统，主要的成分是冰的微粒和较少数的岩石残骸以及尘土。目前已经确认轨道的土星的卫星有 62 颗，而且这个数字也将会长期增长。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。

在望远镜中，土星环是非常美妙的结构，伽利略曾经把它描述为土星的“耳朵”，不少人因为美妙的土星环而成为了天文爱好者。土星环的细微结构可以用更大口径的望远镜来分辨，普通的望远镜可以分辨出卡西尼环缝。需要注意的是，由于土星的公转，土星环的倾角也会发生变化，在一些时候甚至会发生土星环“消失”的现象。<sup>①</sup>

土星表面也存在着一些大气圈层结构，在良好的条件下也是可以看见的。土星最明亮的卫星就是土卫六了，利用小望远镜就可以清楚地看见它。

## 6 天王星和海王星

天王星的轨道半径大约 19AU，轨道周期长达 84 年，亮度约 6 等，用肉眼可以勉强看到，古人几乎不可能注意到它的存在。1781 年英国天文学家赫歇尔 (Hershel) 用望远镜发现了它的踪影，人类对太阳系的认识从此前进了一大步。

<sup>①</sup> 刘佳能拍摄的 12 年来土星环倾角变化：<https://www-ws.gov.taipei/001/Upload/public/Attachment/17259465321.pdf>。

天王星的视直径大约  $3 \sim 4$  个角秒，赫歇尔当时也只是确认出天王星的视圆面而已。现在也跟当时一样，凭借爱好者的设备是难以观测到天王星表面细节特征的——在望远镜中，你只能看出来，这颗星无论如何调焦都不是一个点光源，因而才可以与一般的恒星区别开。

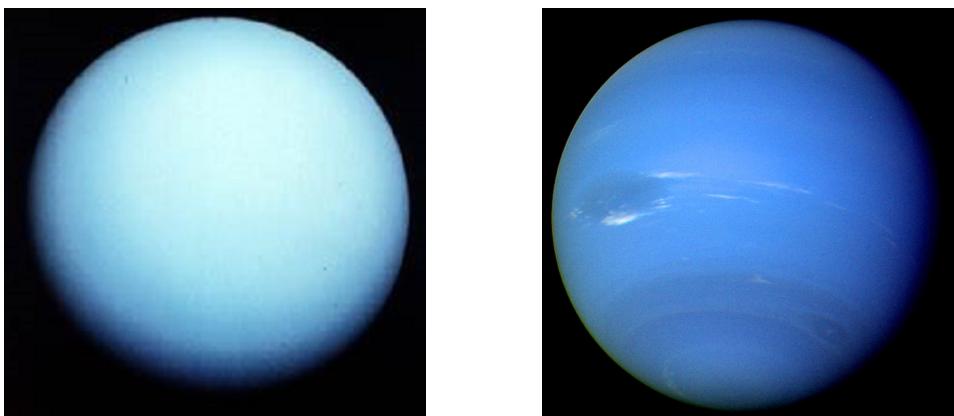


图 3.22 左：天王星；右：海王星。两者均由旅行者 2 号拍摄——换句话说，在地球上还没法看得这么清晰。

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。英国的亚当斯和法国的勒维耶分别做了严密的计算，最终 1846 年德国柏林天文台的伽勒利用勒维耶的预测，发现了海王星，实际位置与理论计算相差不超过  $1^\circ$ ——牛顿力学也因此取得了自诞生以来最大的胜利。

海王星轨道半径约 30 天文单位，需要 165 年才能绕太阳转一周——也就是说，海王星自发现以来刚刚绕太阳完成了一次公转。它的视星等为 8 等左右，视直径约  $2''$ ，对于爱好者级别的望远镜而言，也是只能看见圆面而已，难以观察到其他的细节。

两颗行星有许多共性：它们同样是由大量的氢与氮构成，然而因为距离太阳太远，表面的温度很低，与其说是气态行星，不如说是冰行星更合适些；另外它们都有不少的卫星。它们也各自有一些有趣的特点：天王星是淡蓝色的，自转轴几乎垂直于黄道平面，换句话说，它是“躺着”自转的；海王星的蓝色更深邃一些，表面存在着一些剧烈的大气活动。

## §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、月亮、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，我们会在第四章《特殊天象》中加以讨论。

### 一 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它小天体。

目前国际天文学联合会（IAU）承认的矮行星只有 5 颗：谷神星、冥王星、妊神星、鸟神星、阋神星。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°，仍然难以分辨其表面的细节；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。冥王星目前已知的卫星有 5 颗，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。



图 3.23 新视野号探测器拍摄的冥王星。图片来源：NASA

2015 年 7 月 14 号，新视野号探测器飞跃冥王星，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。

在矮行星中，冥王星、妊神星、鸟神星属于柯伊伯带（Kuiper belt）天体，他们均位于距离太阳 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。

## 二 小行星

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 2016 年 3 月，小行星中心 (Minor Planet Center, MPC) 一共记录了约 130 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。现在小行星现在开始重新分类，其中的一些大块头被重新定义为矮行星。

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<sup>①</sup>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、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，这个区域也被称为小行星带，如右图中白色区域所示。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，他们离地球距离比较近，甚至有可能对地球的安全带来威胁。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，连续观测一般可以观测到其移动。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。

小行星有一项重要的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://sunguo.youyou.lamost.org/yanxing.html>。

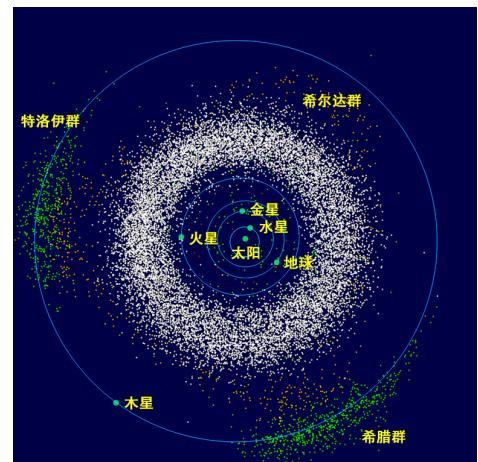


图 3.24 白色部分即为小行星带。图片来源：Wikipedia

## 三 彗星与流星体

太阳系小天体中，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。当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

① 详见维基百科，这是一个关于行星到太阳距离的经验公式。

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。



图 3.25 彗星 C/2014Q2 (Lovejoy)，结构清晰可辨。图片来源：Wikipedia

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 (meteorshower)。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，我们会在第四章《特殊天象》中进一步讨论。

## 补充阅读

1. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Lunar\\_libration\\_with\\_phase2.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Lunar_libration_with_phase2.gif)
2. <https://www.lpi.usra.edu/resources/mapcatalog/>
3. <https://interesting-sky.china-vo.org/>
4. <https://www-ws.gov.taipei/001/Upload/public/Attachment/17259465321.pdf>
5. <https://sunguoyou.lamost.org/yanxing.html>
6. *Fundamental Astronomy*, 6th edition
7. <https://skyandtelescope.org/>

**注 可以加入提丢斯-波德定则的有关内容**

## 第四章 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 4.1 和图 4.2 所示，当月亮的影子挡住地球，就发生了日食；当月亮进入地球的影子，就发生了月食。

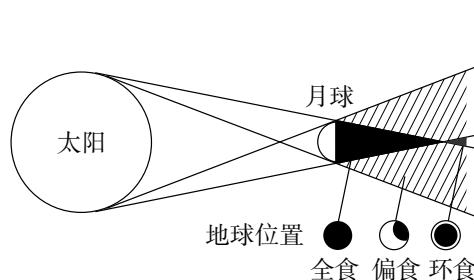


图 4.1 日食的成因

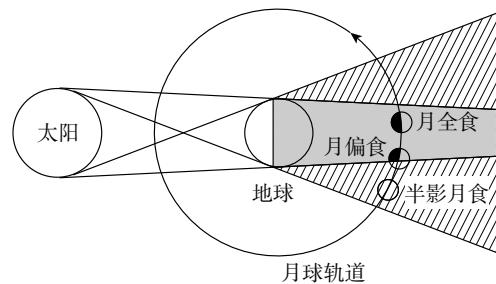


图 4.2 月食的成因

日食分全食，偏食，环食三种。图4.1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。如果地球的一部分位于本影区，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

球上一部分区域。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 4.3 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。

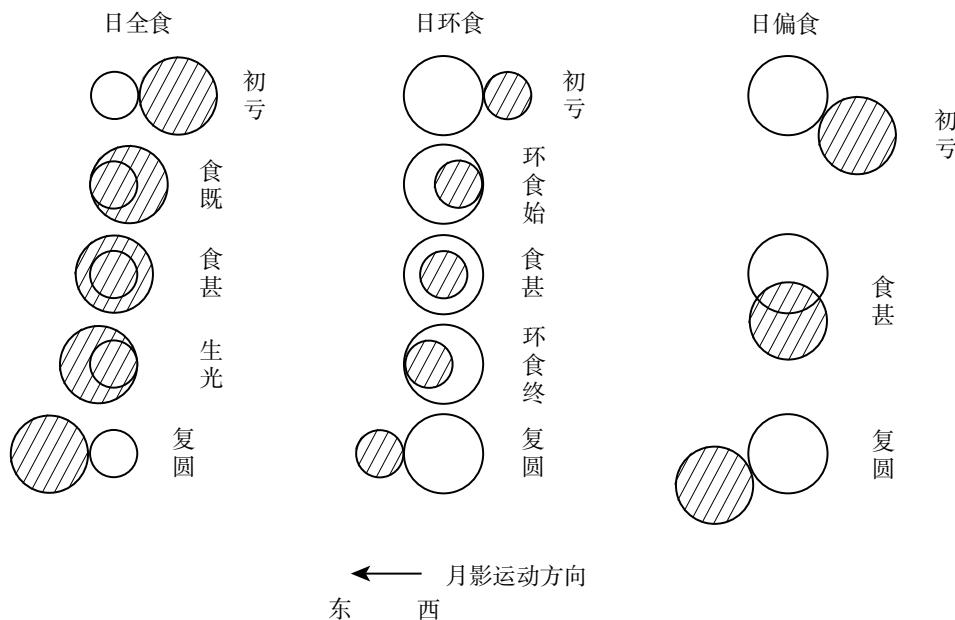


图 4.3 日食的过程。其中阴影表示月影。

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 4.4 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，我们再也见不到农历十五的圆月，而是每月都来一次月食！

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；NASA 则提供了直至 2050 年的日月食预报。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。

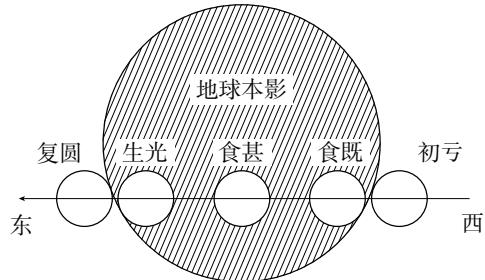


图 4.4 月食的过程

## §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三章已经有所介绍，下面将进一步详细阐述。

### 一 结构与轨道

彗星是由尘埃颗粒和凝固的气体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依柏带，其轨道离心率通常较大，远日点在冥王星之外。这些彗星通常是第一次被人类发现。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减小。在超过 270 颗短周期彗星中，回归时通常肉眼可见的通常只有哈雷彗星。

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。靠近太阳时彗星的大小和亮度都会增加。

## 二 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<sup>①</sup>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。还是以 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：艾森 ISON）发现的。

## 三 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符。比如 2013 年的 ISON 彗星（C/2012 S1）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。

由于彗星是由冻结的气体维系在一起的，当它们经过太阳的时候，气体蒸发逃逸，彗星很可能因此瓦解。所以，对于大彗星的预报，我们不要报以过高的期望。

<sup>①</sup> 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

彗星接近太阳时亮度增加，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观测，因为双筒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。

国际小行星中心的网站上可以查到各种关于彗星的信息，下面这个网址中列出了近期的彗星观测记录，感兴趣的话可以参考：<https://minorplanetcenter.net/iau/Ephemerides/Comets/index.html>。

### §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，周围大气分子受热电离而发光，形成流星。事实上，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。这些群内流星大量出现的现象就是浪漫的流星雨。

#### 一 流星雨的成因

大多数流星雨来自于彗星。如图 4.5 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，彗星上易挥发的物质抛散开来，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个流星雨，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  $\eta$  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。

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

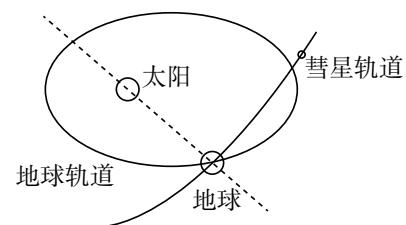


图 4.5 流星成因示意图

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。

## 二 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 4.6 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，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。这一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、狮子座流星雨命名。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  $\eta$  流星雨。

## 三 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<sup>①</sup>。



图 4.6 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

<sup>①</sup> 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。

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 4.7 显示了 2020 年双子座流星雨 ZHR 随时间的变化。

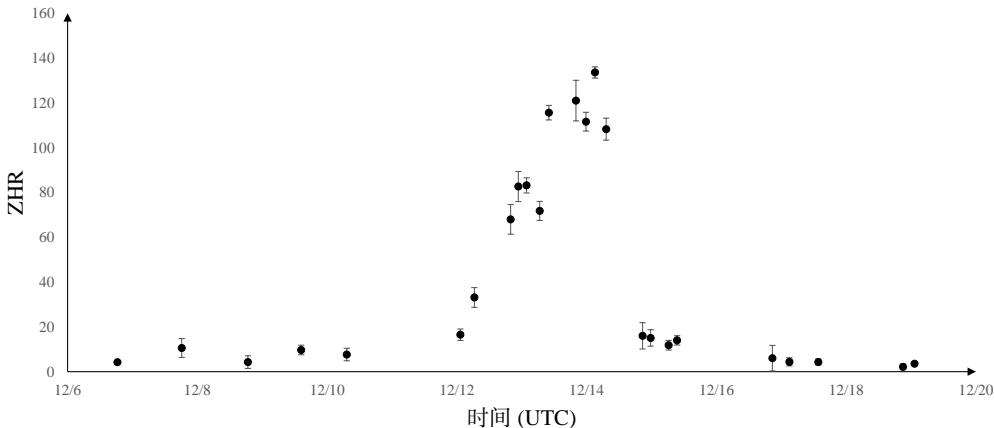


图 4.7 2020 年双子座流星雨 ZHR 图示

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，是极大期前后的当地夜间。

不同流星雨的流量差异很大。一般来说，只有 ZHR 大于 20 的流星雨才适合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 4.1 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。

表 4.1 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
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

## 四 观测流星雨

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，观测流星雨其实需要一定的耐心。

**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。<sup>①</sup>

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：单独每一颗流星出现时刻、位置都无法预知，而且速度很快，亮度、颜色、路径等等需要观测的内容很多。<sup>② ③</sup>

**观测时间** 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。

**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。尽管流星会毫无预兆的从任何地方飞出，但辐射点附近区域的流星数量更多，流星出现的时间更长，因此对于初学者来说，最好的方式就是根据星图，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。

## §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，地球表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上经过，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。

<sup>①</sup> 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>。

<sup>②</sup> 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。在没有特殊目的的情况下，最适合的观测方式是肉眼观测。

<sup>③</sup> 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。

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 $-4$ 等。图4.8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。此时可以看到卫星的剪影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。图4.9是2021年6月3日发生的一次天宫号空间站凌日的画面，太阳圆面上划过的“土”字身影就是天宫号空间站。

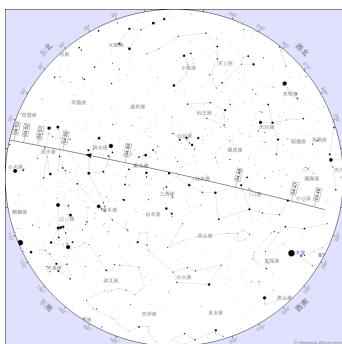


图4.8 天宫号空间站过境星图

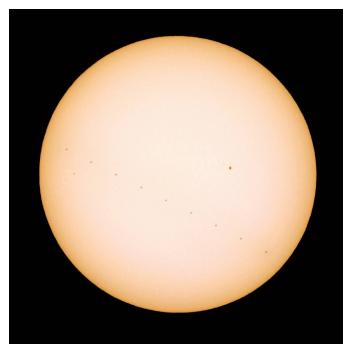


图4.9 天宫号空间站凌日

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。使用“天文通”微信小程序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，也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。



图为 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

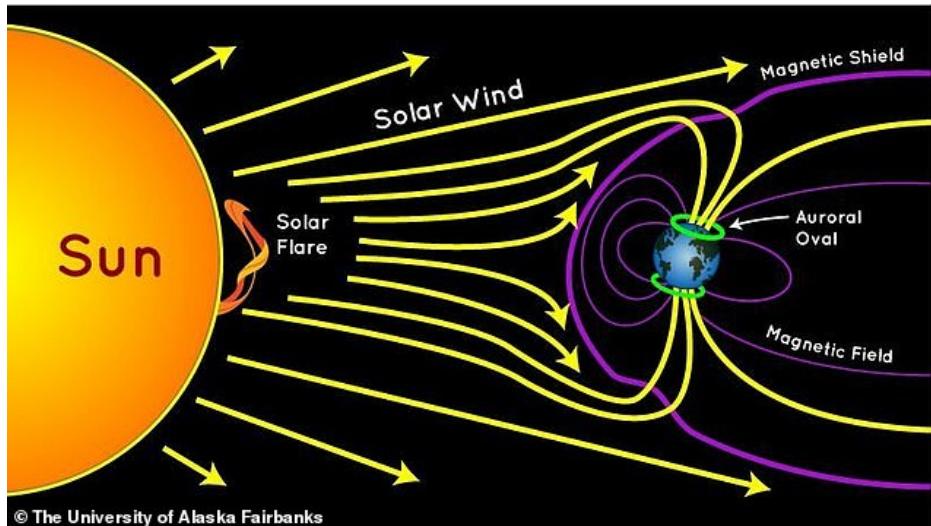
简单地说，极光来源于太阳发射的带电粒子。当这些带电粒子（也就是“太阳风”的成分）进入地球大气层，与地球大气层中的气体分子相互碰撞之后，气体分子受到激发而发光，从而产生了极光现象。从这个方面来看，极光与流星的产生原理是类似的。

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。



图为极光的原理。图片来源于网络。

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 $90^{\circ}$ 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比地理纬度高 $5 - 10^{\circ}$ ；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

一般来说，为了追寻极光，我们需要做到如下几点：

**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 $60 - 65^{\circ}$ 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维纳亚半岛、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 $47^{\circ}$ ）。当然，新疆北部（阿勒泰， $43^{\circ}$ ）、内蒙古东北部（呼伦贝尔， $43^{\circ}$ ）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。

## 第五章 恒星



# 第六章 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热情和欲望。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，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。

### 一 几种天文时标

从地球上看，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)下中天的时刻，也就是午夜。

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， $1\text{ 日} = 24\text{ 时} = 1440\text{ 分} = 86400\text{ 秒}$ 。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。利用时角的概念可以说：真太阳时等于真太阳的时角加上12 h。

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。

由于地球绕太阳旋转，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 $23\text{ h }56\text{ min }4\text{ s}$ <sup>①</sup>，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<sup>②</sup>。

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12 h。

平太阳是想像出来的天体，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

① 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。

② 如果想不明白，可以想像一个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。

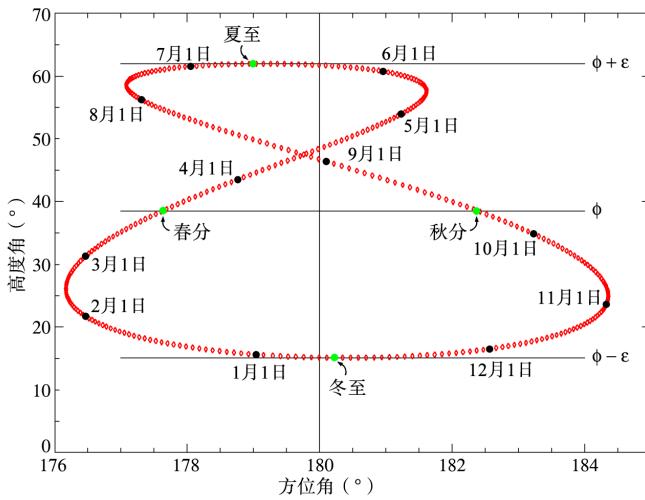


图 6.1 英国格林尼治天文台（纬度 51.4791°N、经度 0°）在 2006 年期间每天中午 12:00 观测太阳位置得到的日行迹。图片来源：Wikipedia。

呈现“8”字形，如图 6.1 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。

## 二 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<sup>①</sup>，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<sup>②</sup>，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

<sup>①</sup> 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。

<sup>②</sup> Newcomb S. Tables of the Motion of the Earth on its Axis and Around the Sun[M]. Bureau of Equipment, Navy Department, 1898.

1月0日<sup>①</sup>12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9192631770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。

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度，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

<sup>①</sup> 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](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）。

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。

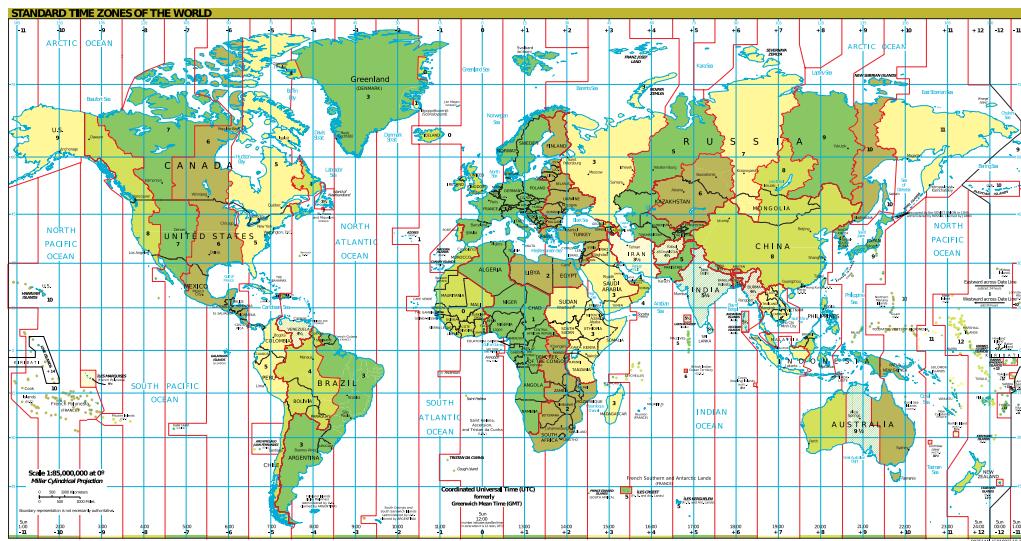


图 6.2 世界时区图。

## §2. 历法

### 一 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，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个月。

## 二 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 11 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 6.1）。二十四节气分为两组：节气和中气，分别对应表 6.1 中深色和浅色区域。

表 6.1 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

(续表)

节气	太阳黄经 (°)	日期 (公历)	节气	太阳黄经 (°)	日期 (公历)
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<sup>①</sup>，农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，所以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到农历十六日，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做章。

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 6.1 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

<sup>①</sup> 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）。

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。

### 三 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 ( $\Sigma\omegaσιγνης$ ) 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为 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 1017 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<sup>①</sup>所定义的儒略年是国际天文联合会推荐的时间计量单位，也被用于儒略历年。

## 四 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<sup>②</sup>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，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<sup>③</sup>。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，在数百年后儒略历年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 所指的就是贝塞尔年 1950 年开始的时刻。

## 五 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

① 这里的“日”指的是 86 400 秒，“秒”采用国际单位制的定义。

② 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。

③ 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。

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<sup>①</sup>的开始；② 它发生在当时已知的所有历史事件之前。某“天”<sup>②</sup>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（Modefied Julian Date, MJD）。简化儒略日期的定义为

$$MJD = JD - 2\,400\,000.5,$$

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、辇道增七……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，每一个小部分就被称为一个星官。与西方严格的星座分区不同，中国古代的星官并没有严格的分区，只有模糊的界限。

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“昴度”“屠肆”，大多在武仙、蛇夫及其附近。

而四象指的是青龙、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；

北方玄武七宿是斗 (dǒu)、牛、女、虚、危、室、壁；

① 儒略周期的具体定义与计算，请参见本章补充阅读部分。

② 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。

西方白虎七宿是奎、娄、胃、昴、毕、觜（zǐ）、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。

## 二 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，对于其他星座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，其他星座也有很多的故事。这里我们举一个例子。仙后座天区在中国古代被分为王良、策和阁道三个星座。其中，王良星座最亮的星是王良，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，知伯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，最终联合韩魏灭了知伯。在王良星座西侧，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。青天会的会星辇道增七便与这一星座有关。这些星座构成了中国古代星空中的车马世界。

## 三 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。

## 四 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 1056 年（1046?）。

西汉时期，天文学家落下闳编制了《太阳历》，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离、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韦烈亚力将威廉·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。

## 五 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 6.3 即为北京古观象台的浑仪，为 2002 年建仿造南京紫金山天文台的明代浑仪所铸。

浑仪结构分为三层，结构如图 6.4 所示，分为内、中、外三层。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。为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。



图 6.3 浑仪实物图，摄于北京古观象台。

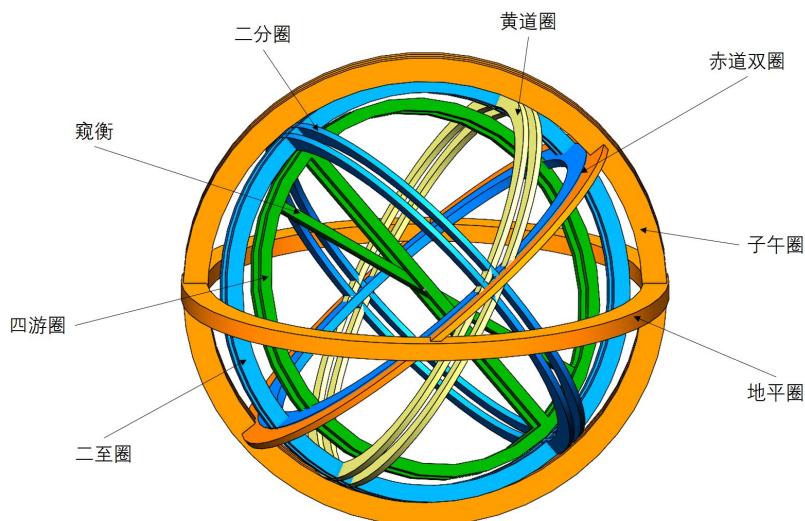


图 6.4 浑仪原理图

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. 希腊神话中的星座

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十二星座的一些星空神话。

### 一 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）。不久卡里斯托便怀孕生下了宙斯的儿子阿卡斯。知道这件事情之后，愤怒的天后赫拉把卡里斯托化为一只大熊，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，卡里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，卡里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，卡力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”。

## 二 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。

## 三 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还要美丽。海仙女向海神波塞冬告状，愤怒的波塞冬把恐

怖的海怪刻甫斯派到了埃塞俄比亚。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），海怪刻甫斯成为了鲸鱼座。

#### 四 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，想趁著他不注意时袭击他。当俄里翁发现毒蝎子时，为时已晚，他一不留神，竟被毒蝎子给螯了一下，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）。

#### 五 黄道十二星座传说与其来源简介

在不同月份，太阳在天球上的位置不同，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

### 六 历书时·力学时标

#### 1 历书时

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，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

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

其中

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

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<sup>①</sup>：

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

关于这个公式的具体含义，读者可以参看原论文。

1991 年，IAU 引入了时空坐标系间的关系，并据此定义了地心坐标时 (Geocentric Coordinate Time, TCG) 和质心坐标时 (Barycentric Coordinate Time, TCB)。

未写完

$$TCB - TCG = c^{-2} \left[ \int_{t_0}^t (\mathbf{v}_e^2 / 2 + U_{\text{ext}}(\mathbf{x}_e)) dt + \mathbf{v}_e \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_e) \right].$$

## 七 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。

<sup>①</sup> 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.

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 6.2 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（Μέτων）。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。



# 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)，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。

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，我们将介绍各类深空天体的性质以及对它们的业余观测。在本章最后，我们将了解整个宇宙的结构和演化，认识宇宙的面貌、过去和未来。

除少数明亮且易分辨的深空天体外，大多数不能用裸眼（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) 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，包含了超过 100 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、更深的方向前进。

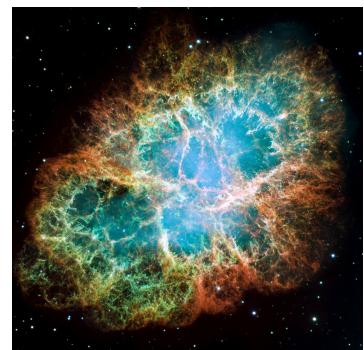


图 7.1 蟹状星云 (M1)，位于金牛座的公元 1054 年超新星爆发遗迹。这个星云的研究史可以说相当于半部天文学史。图片来源：<https://hubblesite.org/contents/media/images/2000/15/960-Image.html>。

## §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。

所有的天体的名字都是由所在的星表编号来确定的，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（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确定的，这其中也有历史文化的因素）。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)、星云星团新总表 (NGC)、星云星团新总表续编 (IC)。其中收录较全的是 NGC 星表 (含 7840 个天体) 和 IC 星表 (含 5386 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。

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》中列出的约一百个天体。梅西耶本身是个彗星搜索者 (Comet Hunter)，他收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。

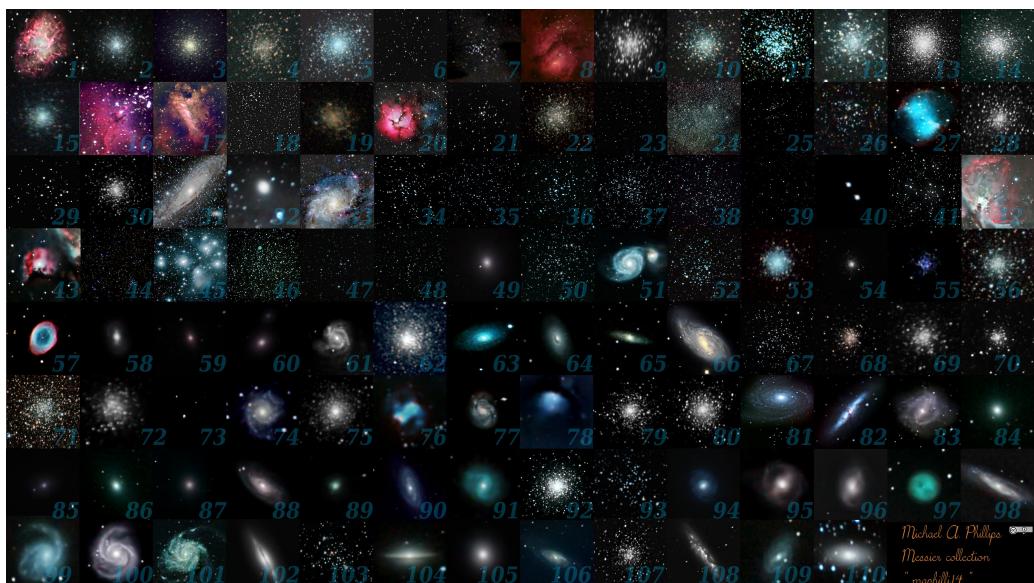
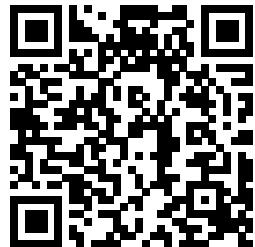


图 7.2 全部的梅西耶天体。图片来源：<http://astromaphilli14.blogspot.com/p/m.html>。

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，因此在北半球中高纬地区，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。你也可以扫描上面的二维码打开它。



### §3. 星团

#### 一 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）。二者形态的区别很明显，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<sup>①</sup>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（譬如分子云和其它星团）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，参见本章星系小节。

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恒星，这是因为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。

由几万颗到几十万颗恒星组成，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**。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。

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。由于它们如此古老，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恒星的碰撞并合。

## 二 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，夏秋冬都是观测疏散星团的好季节，英仙座双星团、昴星团、鬼星团都是裸眼可见的目标；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。

球状星团分布较为均匀，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  $\omega$  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

### 一 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。



图 7.4 哈勃望远镜最著名的照片之一就是这张“创生之柱”<sup>①</sup>（Pillars of Creation）。在鹰状星云（M16）的核心区，深色的气体云中闪烁着微暗的星光——笼罩在星云的面纱下，是新一代恒星的诞生。

### 二 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马头星云。

### 三 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，那么它将在紫外线下激发或电离，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<sub>α</sub> 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）都是北天著名的发射星云，都呈漂亮的红色，在良好的观测条件下都是肉眼可见的目标。

<sup>①</sup> 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>。



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），在 IC 434 内，黑色的部分酷似马头，其背景为红色的发射星云，左下角明亮的蓝色部分（NGC 2023）是一个反射星云。图片来源：Wikipedia。

## 四 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（图片可以参考星团一节）。

## 五 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。

## 六 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，十八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。图见本章开头。

## 七 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）。

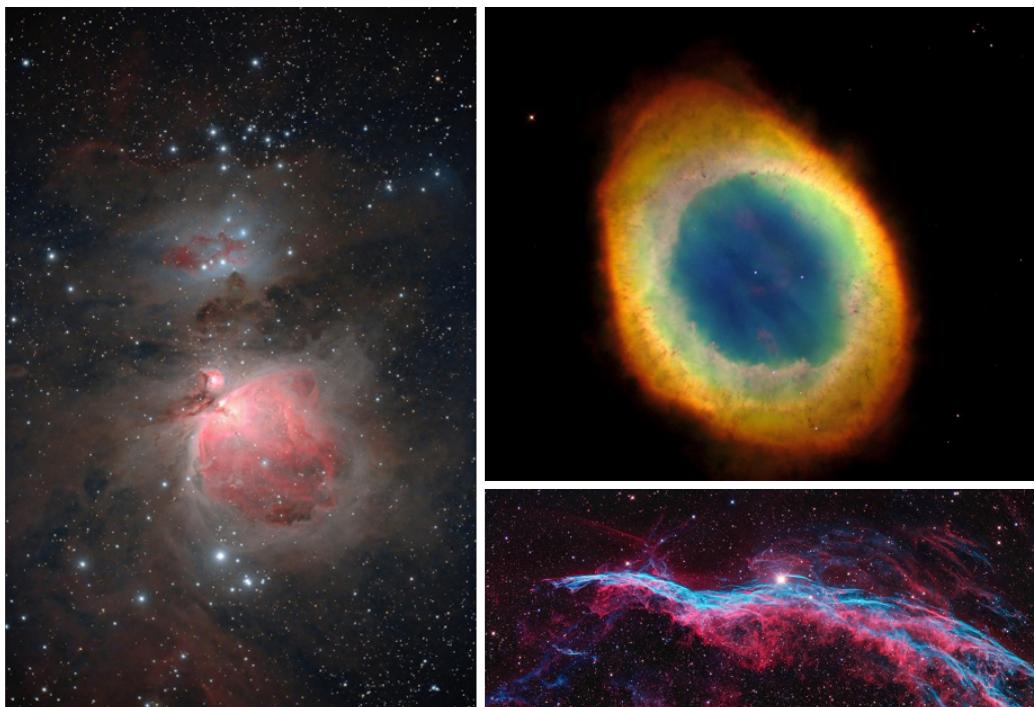


图 7.6 左：猎户座大星云（M42，弥漫星云）；右上：指环星云（M57，行星状星云）；右下：面纱星云（NGC 6960，超新星遗迹）。图片来源：Wikipedia。

## 八 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，更讲究技巧和经验（常常需要运用侧视法<sup>①</sup>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

### 一 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<sup>②</sup>。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）、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：

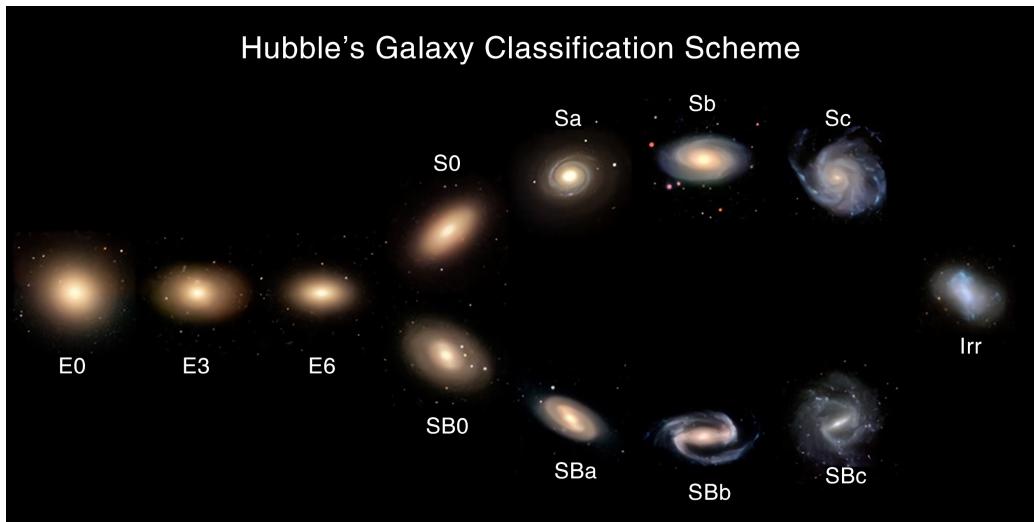


图 7.7 哈勃星系分类法示意图，左边是椭圆星系，上边是旋涡星系，下边是棒旋星系，右边是不规则星系。由于排列有点像音叉（如果不算不规则星系的话），所以往往又被称为“哈勃音叉图”。

① 将要观测的目标放在偏离视野中心  $10^{\circ}$  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。

② 引用来源：Wikipedia 的 Galaxy 词条。

**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。

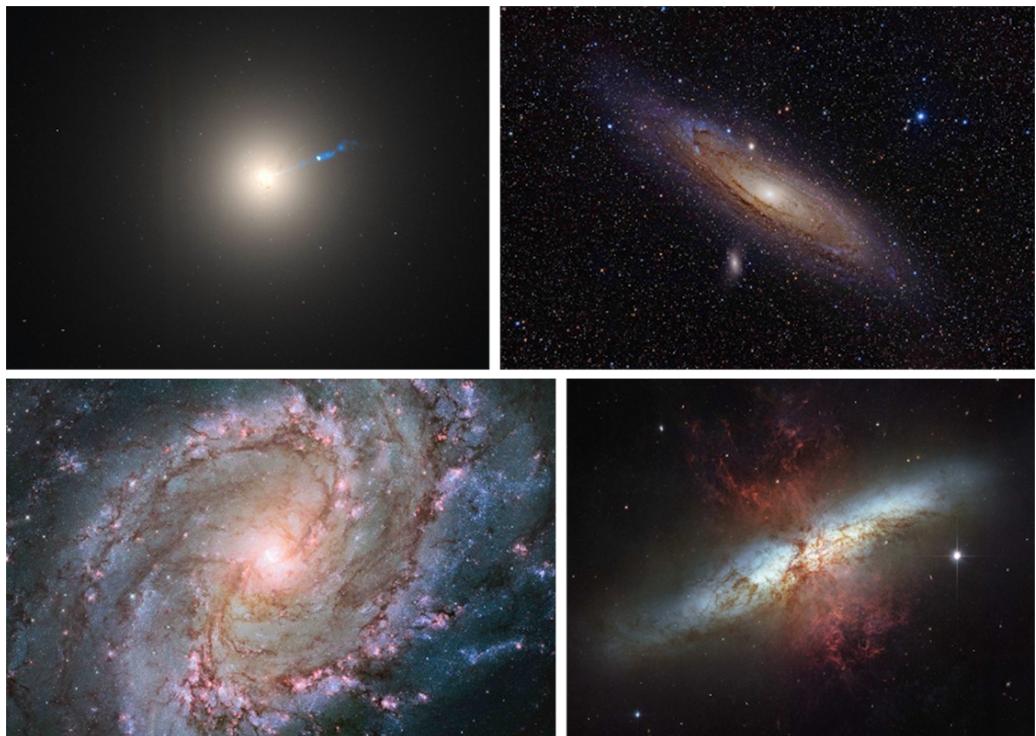


图 7.8 左上：室女 A 星系 (M87, 椭圆星系); 右上：仙女座大星系 (M31, 旋涡星系); 左下：南风车星系 (M83, 棒旋星系); 右下：雪茄星系 (M82, 不规则星系)。图片来源：Wikipedia。

**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使它失去了原形，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) 也许是比較有名的不规则星系。

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)，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，它们同时也是星暴星系。图片来源：Wikipedia。

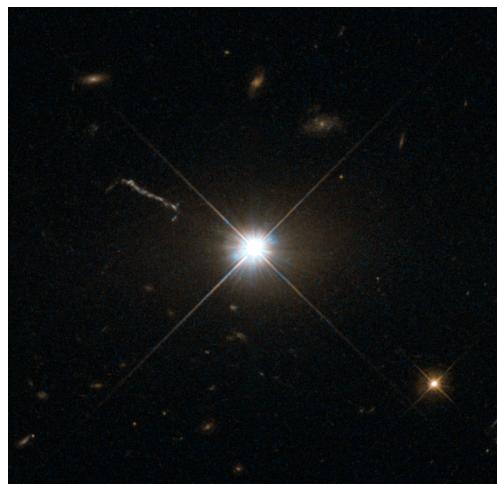


图 7.10 类星体 3C 27。图片来源：Wikipedia。

## 二 银河系

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。

现在的研究证实，银河系是一个 SBc 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旋涡结构，位于在银盘上。从银河系的核心展出四条旋臂：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。

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隐蔽的暗物质和暗能量。

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，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，这种螺线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四条旋臂：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。

从地球上看，最壮丽的银河出现在夏季，夏季的银河面对的是银心的方向，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，

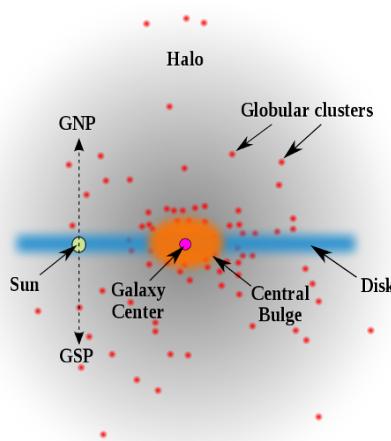


图 7.11 银河系剖面的示意图。图片来源：  
Wikipedia。

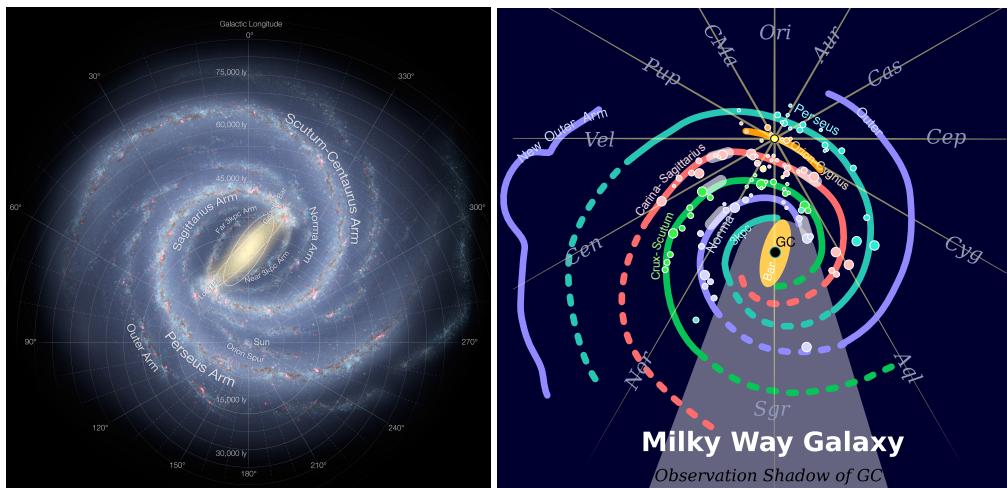


图 7.12 银河系结构示意图。太阳仅仅是猎户-天鹅臂（Orion-Cygnus Arm）上再普通不过的一颗恒星。图片来源：<https://www.eso.org/public/images/eso1339e/>。

也是极其壮美的景致。

### 三 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，其影像会差得很多。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<sup>\*</sup>

### 一 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、西方中世纪的地心说体系等。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对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。

## 二 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)。

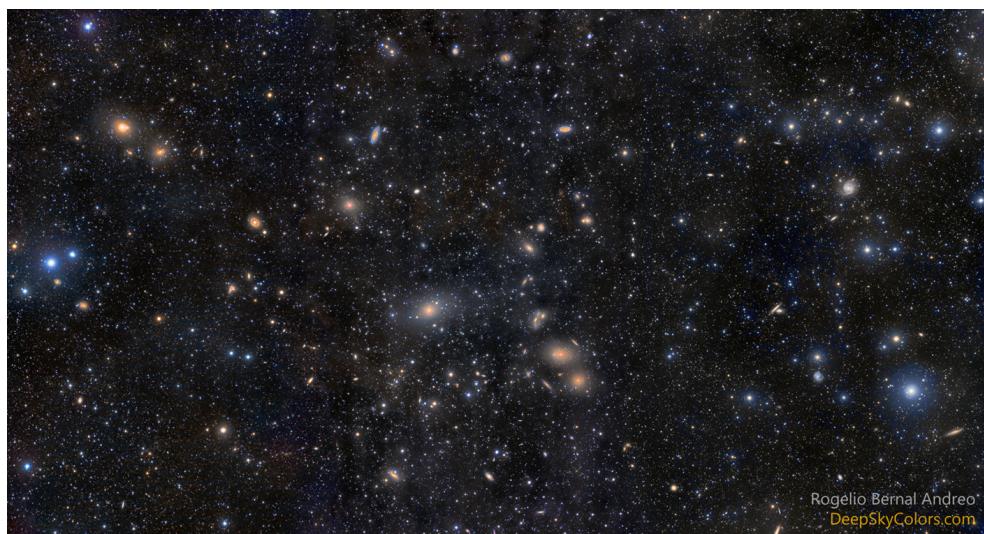


图 7.13 室女座星系团。图片来源：APOD (<https://apod.nasa.gov/apod/ap150804.html>)。

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，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。

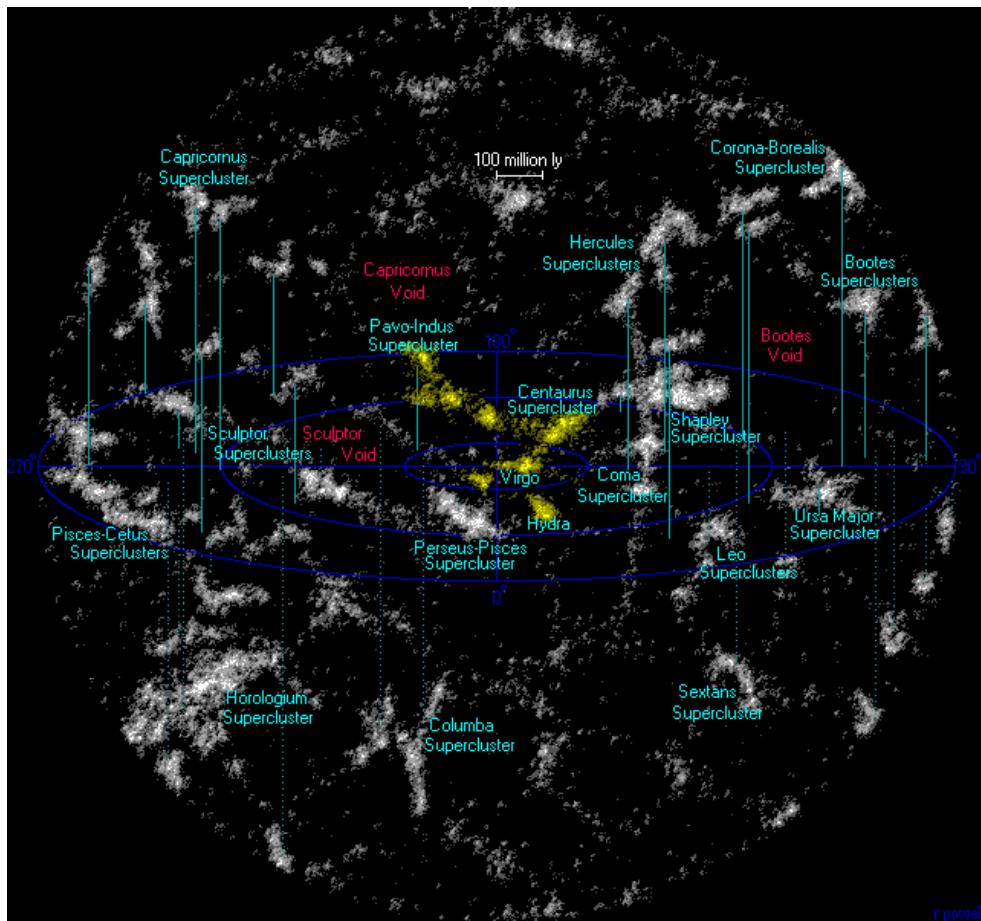


图 7.14 近邻宇宙中的超星系团结构，其中拉尼亚凯亚超星系团用黄色标出。图片来源：Wikipedia。

2014 年的研究<sup>①</sup>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星系团（Laniakea Supercluster）中，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，又被称为“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。

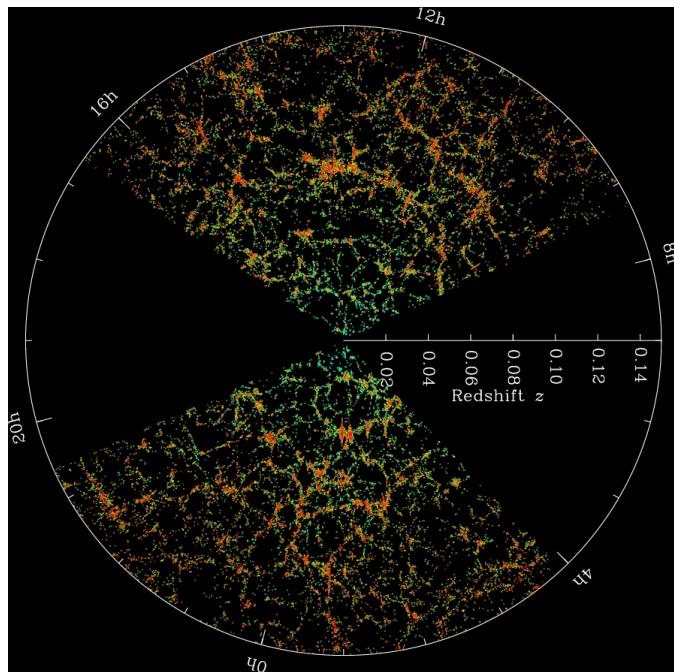


图 7.15 斯隆数字化巡天（SDSS）发布的大尺度结构。图片来源：<https://blog.sdss.org>。

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<sup>②</sup>的，这是宇宙学原理（Cosmological principle）的基本假设。

① Tully R B, Courtois H, Hoffman Y, et al. The Laniakea supercluster of galaxies[J]. Nature, 2014, 513(7516): 71-73.

② 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。

### 三 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**。

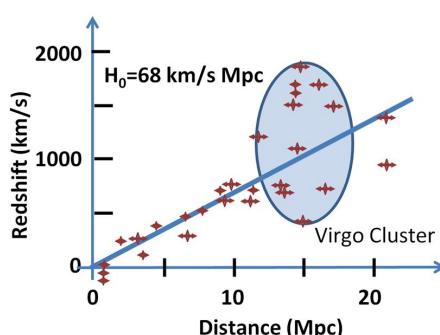


图 7.16 哈勃定律的拟合：星系的退行速度与距离大致成正比。图片来源：Wikipedia。

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，在宇宙的过去，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)。

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。

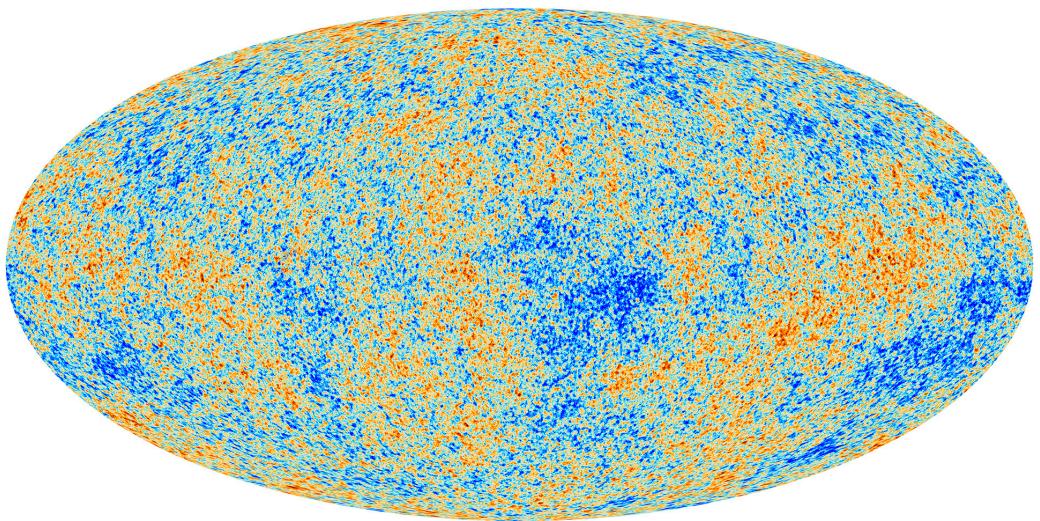


图 7.17 Planck 卫星探测到的宇宙微波背景辐射，其中的色阶代表辐射温度相对于平均温度的微小涨落，这些涨落蕴含着宇宙的结构信息。图片来源：[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2013/03/Planck\\_CMB](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_CMB)。

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 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 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，宇宙的过去是有限的，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）。本章的最后一节将介绍大爆

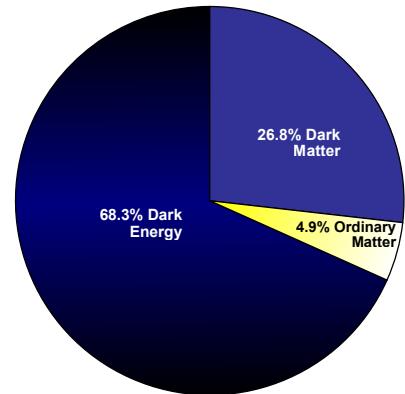


图 7.18 今天宇宙的组成成分。图片来源：Wikipedia。

炸理论所给出的宇宙演化历史。

#### 四 宇宙的演化

在本节中，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。

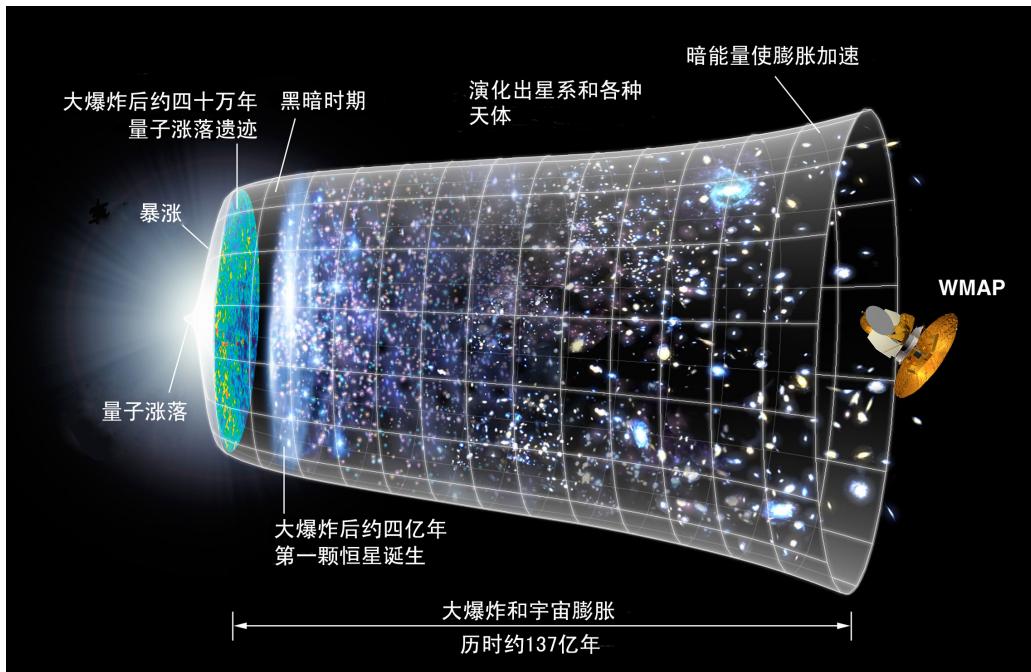


图 7.19 宇宙演化史图示，其中横坐标表示宇宙演化的时间，而对应的空间尺寸（不成实际比例）都用相应的圆横截面表示。图片来源：<http://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html>。

**$0 \sim 10^{-43}$  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：**这一时期为暴涨时代（Inflationary epoch）。在暴涨子（Infla-

ton) (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, 这一过程称为再加热 (Reheating)。

**$10^{-32} \sim 10^{-12}$  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, 电弱相互作用分离成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。

**$10^{-12} \sim 10^{-5}$  s:** 这一时期被称为夸克时代 (Quark epoch), 宇宙的温度为  $10^{15} \sim 10^{12}$  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。

**$10^{-5} \sim 1$  s:** 这一时期被称为强子时代 (Hadron epoch), 宇宙的温度为  $10^{12} \sim 10^{10}$  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  $t \approx 1$  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。

**$1 \sim 10$  s:** 这一时期被称为轻子时代 (Lepton epoch), 宇宙的温度为  $10^{10} \sim 10^9$  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。

**$10 \sim 10^3$  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  $10^9 \sim 10^7$  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  $^1\text{H}$  和  $^4\text{He}$ , 此外还有痕量的  $^2\text{H}$ 、 $^3\text{He}$  和  $^7\text{Li}$ 。

**$10$  s  $\sim$  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。

**$1.8 \sim 37$  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  $\sim$  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（Stellariferous 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。宇宙当前的年龄为 13.7 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，或者有志于涉足相关专业领域，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，等待溢满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）、俄罗斯联邦航天局（Roscosmos）、欧洲航天局（ESA）、日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）和印度航天研究组织（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）创建的维珍银河公司（Virgin Galaxy）、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，它利用火箭的反作用力可以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，表明火箭正在向着可重复使用的方向发展，出现这一浪潮是必然的。

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的相似，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。

## 一 动力

火箭发动机是火箭的心脏，是火箭最核心也是最容易造成事故的部件。衡量火箭发动机性能的参数主要有推力、总冲、比冲等。

**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。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

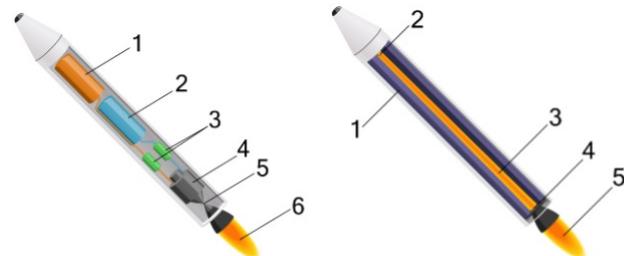
图 8.1 两种火箭的尾焰

## 二 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。



左：液体火箭结构简图 1:液体燃料 2:氧化剂 3:泵 4:燃烧室 5:喷管 6:尾焰  
右：固体火箭结构简图 1:固体燃料 2:点火器 3:燃烧室 4:喷管 5:尾焰

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 m/s，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，2017 年 NASA 的 X3 霍尔推进器也只达到了 5.4 N 的推力。

世界知名火箭发动机部分性能参数列在下表中。

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) 海平面 / 真空	比冲 (m/s) 海平面 / 真空	室压 (MPa)	应用火箭
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	12000	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

### 三 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，是仅次于

苏联能源号运载火箭的推力第二大运载火箭，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，GTO 运力 45 吨。美国在 1967 年-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 型重型火箭是美国现役并已执行任务的最大型运载火箭，高 71.6 米，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。它 13 次任务中，除了第 1 次发射部分失败外，其余 12 次获得了成功。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 m 或 5 m 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。目前该型火箭发射 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。发展阶段爆炸多次，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，发射次数已经突破 120 次，成功率极高。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，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，SSO 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使用四氧化二氮-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。目前已经发射 426 次，其中 378 次成功，成功率 88.7%，目前在役。

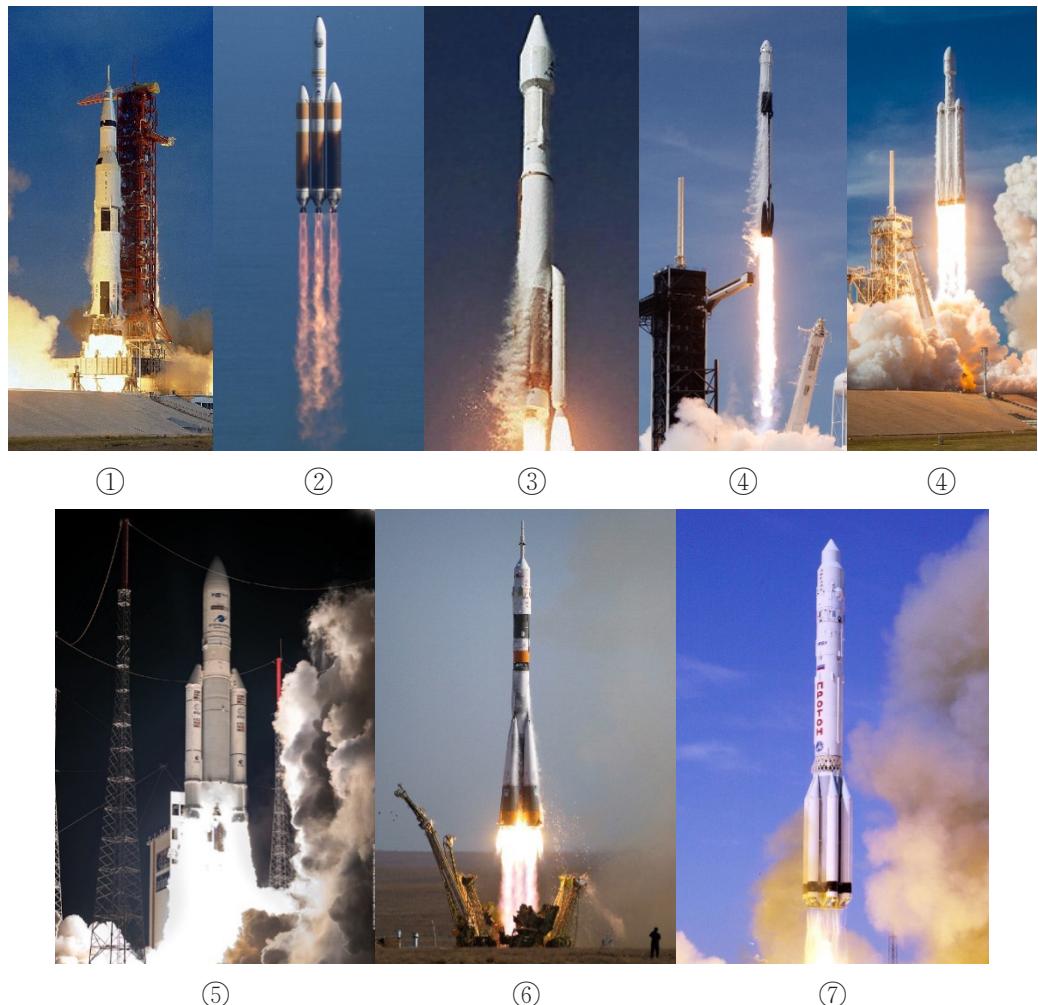


图 8.3 世界知名火箭（①—⑦）

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-偏二甲肼燃料，其中长征二号 F 运力最高，为 8.8 吨；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。

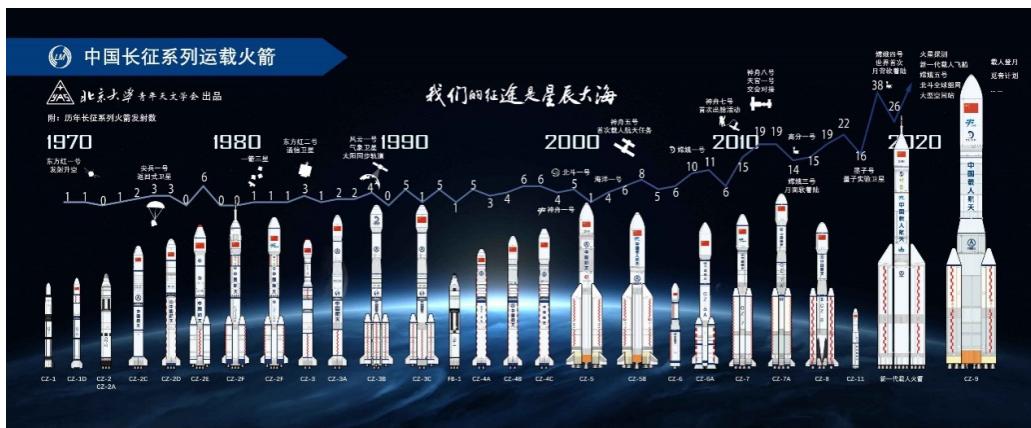


图 8.4 中国长征系列运载火箭图谱

### §3. 人造地球卫星

根据 UCS Satellite Database 的数据，截止 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都已经离不开这些天上飘的卫星了。

## 一 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严格定义，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，则这种卫星轨道叫太阳同步轨道。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，可使拍摄的地目标图像最好。

**地球静止轨道（GEO）** 需要注意的是地球同步轨道和地球静止轨道不相同，前者轨道倾角不一定为0。这种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，所以称地球静止轨道。卫星运行在这种轨道，很适合连续通信和对地观测。地球静止轨道资源十分紧张。中国大部分通信卫星以及风云2号、4号和高分4号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，于是采取闪电轨道。它为倾角为 $63.4^{\circ}$ 的高椭圆轨道，其近心点幅角为 $-90^{\circ}$ ，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。

## 二 早期人造地球卫星

人造卫星同样也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**（Sputnik）。它是一个直径58.5厘米的球体，重83.6千克，设计寿命3个月。火箭总设计师科罗廖夫说过：地球是球形，所以第一颗卫星也必须是球形。第一颗人造卫星实际上非常的简陋，它与普罗大众唯一的交互即是向地面不断发送“嘟、嘟”的无线电信号，到电池耗尽时，持续了22天。为了纪念其划时代的意义，斯普特尼克一号后来被命名为“人造地球卫星一号”，简称“卫星一号”，最终，它于1958年1月4日再入大气层烧毁。

美国第一颗卫星**探险者1号**（Explorer 1）于1958年1月31日发射，重13.97千克，于1970年3月31日再入大气层烧毁。

1965年11月26日，**阿斯特里克斯号**（Asterix）由法国的钻石号运载火箭发射升空，在发射后只工作2d就因故障而终止工作。卫星质量41.7千克。

日本于1970年2月11日成功地发射了第一颗人造卫星**大隅号**。该星仅重9.4千克，卫星发射成功但在一天后即失去联系。

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**。卫星重173千克，由长征一号运载火箭送入近地点441千米、远地点2368千米、倾角 $68.44^{\circ}$ 的椭圆轨道。卫星进行了轨道测控和《东方红》乐曲的播送。东方红一号卫星在轨工作了28天（设计寿命20天）。东方红一号卫星目前仍在空间轨道上运行。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。

### 三 卫星星座

我们经常会注意到我们发射的卫星并非个个不同，而是分属于不同的系列，其中一些系列的卫星正是需要组合起来才能发挥出全部的效用，这样就构成了所谓的人造卫星星座。

比较出名的一些卫星星座包括导航相关的 GPS、CALILEO、GLONASS 以及我国的北斗，对地观测的比如我国的高分，气象相关的如风云，通信相关的如 SpaceX 的 Starlink 星链和美国的 Iridium 银星星座。

### 四 过境卫星观测

相关内容请移步第四章第 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的唯一一片宇宙。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。在此选择了最具有意义的几个任务对人类的太阳系探测进行介绍。

### 一 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 kg、721.9 kg，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钚-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。第三章中天王星和海王星的照片均由旅行者 2 号拍摄。

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，

图 8.5 海王星上的卷云



图 8.5 海王星上的卷云

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。



图 8.6 旅行者 1 号拍摄的木星大红斑

## 二 伽利略号木星探测器

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。



图 8.7 在地面测试阶段的伽利略号

伽利略号绕木星 34 周，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。

### 三 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。

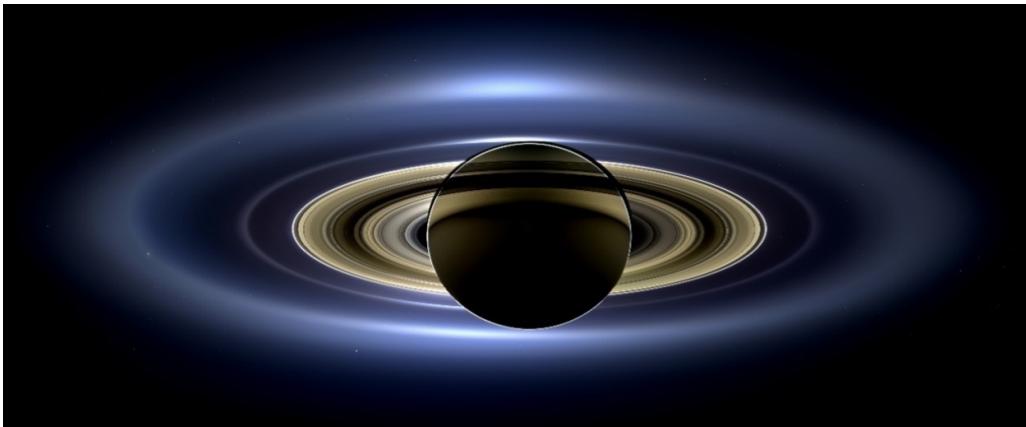


图 8.8 卡西尼号经典摄影作品：The Day the Earth smiled



图 8.9 惠更斯号拍摄的土卫六地表

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 kg，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，化为土星大气的一部分。

### 四 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 m，宽2.8 m，高2.1 m，重899 kg。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、潮湿演化为如今冰冻、干燥的气候。



图 8.10 好奇号火星车经典角度的自拍



图 8.11 机智号火星直升机

**毅力号火星车** (Perseverance) 的设计参照了好奇号，重量达到了 1025 kg，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 kg，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。

## 五 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。

**嫦娥一号**于 2007 年 10 月 24 日发射。嫦娥一号重 2350 kg，并于 2007 年 11 月 5 日成功进入月球轨道，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，圆满实现工程目标和科学目标。最终于 2009 年 3 月 1 日受控撞击月球。

**嫦娥二号**于 2010 年 10 月 1 日发射。嫦娥二号是嫦娥一号的备份星，成功获取了分辨率优于 10 m 的月球表面三维影像，并环绕探测了月球物质成分及月壤特性。绕月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



图 8.12 嫦娥二号拍摄的图塔蒂斯小行星间隔成像照片

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。

嫦娥三号于 2013 年 12 月 2 日发射，由着陆器及巡视器——玉兔号月球车组成，总重 3800 kg。12 月 14 日，嫦娥三号着陆月面，着陆器和巡视器分离；12 月 15 日，嫦娥三号着陆器和巡视器互拍成像，标志着嫦娥三号任务圆满成功。2014 年 1 月 25 日凌晨，玉兔号进入第二次月夜休眠。但在休眠前，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 m。而设计寿命 1 年的嫦娥三号着陆器则非常长寿，已经打破了全球探测器在月面工作最长时间纪录。

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，承担嫦娥五号取样后，以第二宇宙速度再入返回的技术验证任务。发射后绕月并返回地球，三日后返回舱成功在四子王旗着陆场着陆。

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。

嫦娥四号于 2018 年 12 月 8 日发射，是嫦娥三号的备份星，大体设计相同。嫦娥四号是人类第一个着陆月球背面的探测器，于 2019 年 1 月 3 日成功在月球背面艾特肯盆地着陆，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 m，并将继续坚定地走下去。

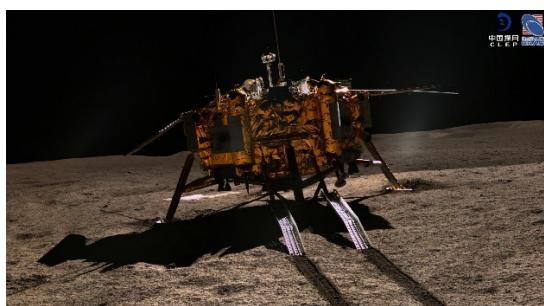


图 8.13 嫦娥四号



图 8.14 玉兔二号月球车的影子

嫦娥五号于 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。嫦娥五号由轨道器、返回器、着陆器、上升器四部分组成，总重 8200 kg。12 月 1 日，嫦娥五号在月球正面预定着陆区着陆，采集 1731 g 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。

## 六 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240kg。

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7月底，祝融号火星车行驶里程已经突破800米。

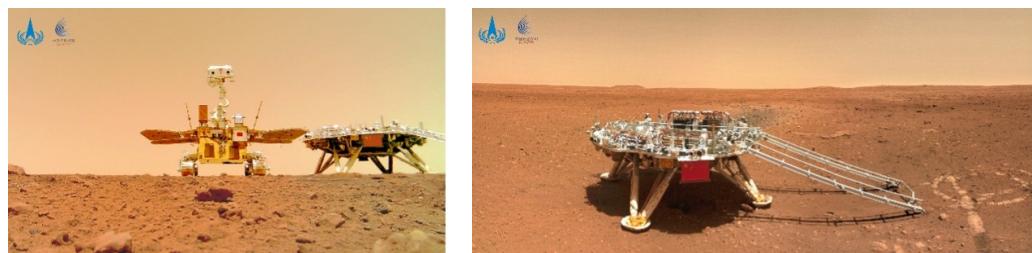


图8.15 祝融号传回的火星影像

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。

## 一 早期载人航天



图 8.16 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。

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号在拜科努尔航天发射场升空，前苏联宇航员尤里·加加林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。

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”的水星飞船将阿伦·谢泼德匆匆送入亚轨道，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，美国由“水星”飞船拓展到“双子座”飞船，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，最多可乘载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 8.17 美国第一次载人航天任务，阿伦·谢泼德升空瞬间。

## 二 美国——阿波罗登月计划

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。

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，宇航员维尔基尔·格里森、爱德华·怀特和罗杰·查菲在大火中身亡。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98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。

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、巴兹·奥尔德林、迈克尔·柯林斯驾驶着阿波罗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



图8.18 冯布劳恩与土星五号巨大的F1发动机合影

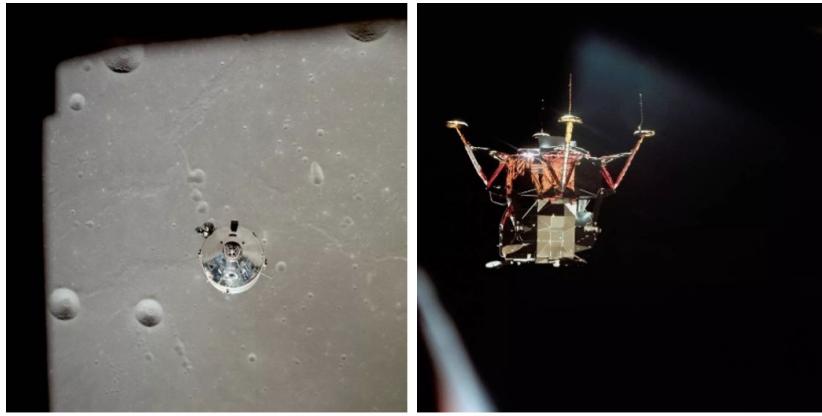


图 8.19 阿波罗 11 号指令与服务舱和登月舱分离时两舱互拍照片

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 4 KB”的内存溢出了，重启后可以正常着陆；直到着陆前 304 m 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 m 时，推进剂只够维持 90 s。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。

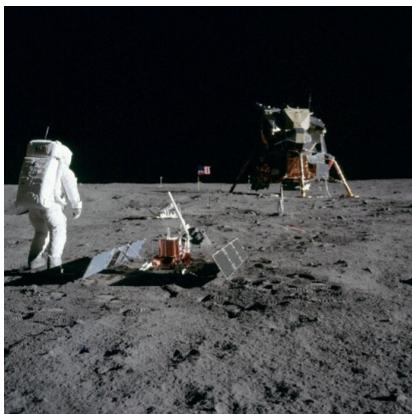


图 8.20 阿姆斯特朗使用哈苏相机拍摄的奥尔德林、被动地震实验仪和登月舱

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 kg 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。

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。

每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, 大家才不把我当做一名宇航员看?”的感慨; 阿波罗 14 号宇航员艾德加·米切尔回来后专注于通灵学, 并创立了研究超自然现象的“思维科学研究会”; 阿波罗 15 号宇航员詹姆斯·艾尔文返回后创立了名为“高飞”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 m 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。

### 三 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 8.21 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。

#### 四 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，美国正式把研制空间运输系统（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。

设计航天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



图 8.22 哥伦比亚号 STS-1 任务首秀



图 8.23 挑战者号航天飞机发射阶段爆炸 图 8.24 哥伦比亚号航天飞机再入大气层时解体

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和过低的安全系数，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，诉说着他们曾经辉煌的历史。

## 五 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 / Буран)。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。

## 六 国家空间站（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。

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水落石出——由美国国家航空航天局（NASA）、俄罗斯联邦航天局（Roscosmos）牵头组建，欧洲航天局（ESA）、日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）和加拿大空间局（CSA）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，美国宇航局局长丹尼尔·戈尔丁（Daniel Goulding）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。

垂暮之年的国际空间站还有新鲜血液流入。2020 年 5 月 30 日，SpaceX 公司的载人龙飞船首次载人发射成功，此后 SpaceX 公司的龙飞船将逐渐挑起空间站人员与货物运输的大旗。2021 年 7 月 21 日，国际空间站著名“鸽王”——俄罗斯科学号实验舱乘质子-M 运载火箭成功上天，这一舱段于 1995 年作为国际空间站曙光号的备份舱开始建设，直到 2004 年俄罗斯决定将其改造为正式实验舱，其发射工作一推再推十多年，能够上天实属不易，活似一个出生即 70 岁的婴儿。



图 8.26 国际空间站

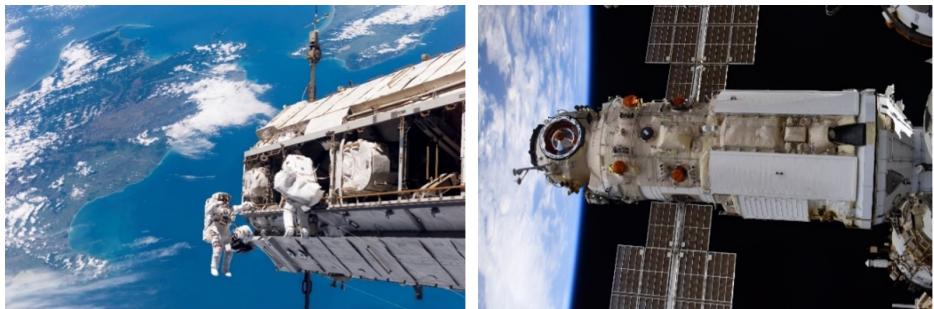


图 8.27 STS-116 任务的宇航员进行太空行走，安装衍架有关设备  
图 8.28 2021 年 7 月 29 日拍摄的“崭新”科学号实验舱

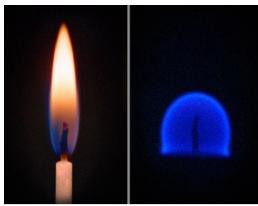


图 8.29 地面的火苗与国际空间站的火苗对比

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。

$\alpha$  电磁光谱仪是国际空间站最广为人知的仪器之一。它重达 7 吨，能耗和通信带宽巨大，每秒钟产生的数据量有 1GB 之多，使它无法部署在常规的卫星平台上，只有国际空间站才“养”得起这样一个大设备。1976 年诺贝尔物理学奖获得者，美籍华人丁肇中是  $\alpha$  电磁光谱仪的设计者与首席研究人，他在 1995 年提出该项目并被 NASA 采纳，来自 16 个国家 56 个机构的 500 多名科学家耗资 20 亿美元推进了该项目。 $\alpha$  电磁光谱仪可以探测反物质的有关线索，从而帮助人类寻找暗物质存在的证据，并探寻宇宙的起源。2013 年 3 月，丁肇中团队发表了初步的研究结果， $\alpha$  电磁光谱仪成功观测到超过 40 万个正电子，期待它进一步的研究能带给人类关于宇宙起源的关键信息。

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 44 页。

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？

## 七 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。

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。



图 8.30 天和核心舱地面测试与发射

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，与天和核心舱号对接，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。

## 八 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 Galaxy）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。而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，还需要了解观测地的天气情况。这也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是相当落后的，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，而一本烂书往往充斥着过时、错误、无聊的信息。以下是我们筛选出的推荐书目：

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，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者谢懿，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。至于缺点，笔者认为这本书的排版有点别扭。**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。非要说缺点的话——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，主要受众目测是广大中小学生。《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，并配有包含连线和图绘的星野照片。本书对了解神话，配合星图实际认识星座应

该不错。

*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，但是善于搜索可以找到电子书甚至是中文翻译。

*The Urban Astronomer's Guide* 一本在光污染比较严重的天空中的观测指南，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，网上有电子版。

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. 星图相关

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。

**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——但笔者觉得如果单论观测时翻阅的方便程度而言，是不如《实用全天星图》这样的普通星图的——硬纸本的设计和笔者始终适应不了的天区划分，让我觉得有些不适合观测时使用。

**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。笔者使用了 6 年的星图！

**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，创刊已有 58 年，是影响力最大的科普杂志，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。

### §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 是免费软件，支持各种操作系统，下载地址为 [www.stellarium.org](http://www.stellarium.org)。功能相似的软件还包括 Celestia，StarryNight，WorldWideTelescope 等。其中 StarryNight 是收费软件，功能相应最强大。

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 是一款宇宙模拟沙盒游戏，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，炸掉某个星星什么的，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：天文通提供了天气预报、天象预报、光污染地图以及一个简单的星图（数据看上去应当来自 Stellarium），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使用感受。

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。大多数相关信息都可以通过同好或网络获知，鉴于篇幅和笔者水平有限，不做过多介绍。

## §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。

### 一 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。

<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。

<http://www.cloudynights.com/index> 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一些与天文有关，可以在图书馆主页查找。

## 二 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。北京大学青年天文学会公众号会定期发一些天象预报、天文照片与天文科普等内容。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、@ 北京天文馆朱进、@ 小龙哈勃等等。

## §6. 公众设施

北京天文馆落成于于 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，详细信息可以关注它们的主页 [www.bjp.org.cn](http://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。但是从地形来看，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。但是对于天文观测来说，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，网上也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，网上一些观测地信息已经过时，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，因此后来没有再在此地举办观测，建议有意去观测者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；但是冬季寒冷，景区封闭，农家乐也会关闭，故不适合冬季观测。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，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一些。

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水镇开发强度很大，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. 发展历程

本节内容主要节选自青年天文学会《会史》。

### 一 “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。

## 二 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。

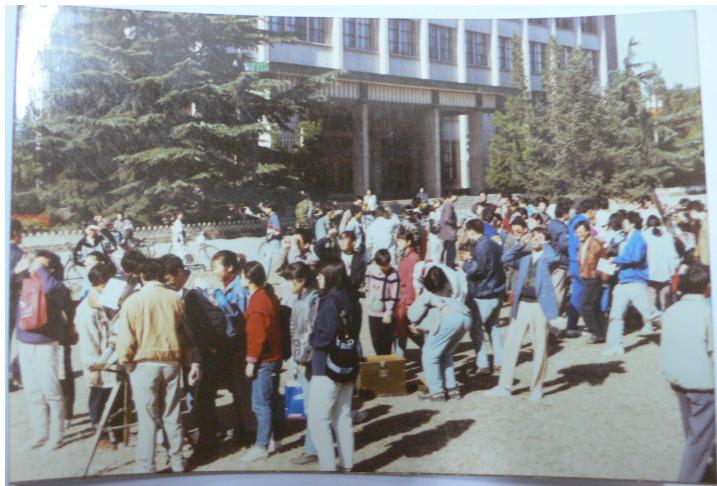


图 10.2 1995 年天文科普周的日食观测

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。

### 三 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。

#### 四 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。

2013年青天会为反对伪科学做出贡献。当时“万有能量的哲学原理”系列讲座巡讲至，主讲人王吉绯自诩天文爱好者，但其实际宣扬内容和基本知识存在诸多学术错误，其所讲授的内容为伪科学，本人为所谓的“民间科学家”或曰“民科”。为了保证学术的严谨和学会的声誉，北京大学青年天文学会经过慎重考虑，拒绝了主办方的协办邀请，同时严正呼吁北京大学学生会本着严谨和慎重的态度对待此讲座。之后，

北京大学学生会相关负责人与本会会长一同拜访了北京大学物理学院天文系多名资深教授，最终成功叫停叫停此讲座。在北大的表率下，清华、北师等高校的同系列讲座均受到抵制并告取消。

## 五 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。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，10 寸“大黑”望远镜，C11HD 折反望远镜，日珥镜以及配套赤道仪、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。

## §3. 活动介绍

## 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	常见天体的亮度 .....	8
1.7	地平坐标系 .....	12
1.8	北天极高度与地理纬度的关系 .....	12
1.9	地平-赤道坐标系。图片来源:《基础天文学》。 .....	13
1.10	北极、赤道和中纬度下天体的周日视运动 .....	14
3.1	太阳系示意图 .....	18
3.2	太阳结构示意图 .....	19
3.3	太阳黑子 .....	20
3.4	日珥 .....	20
3.5	福州一中的同学利用投影板观察日环食 .....	21
3.6	日面上的暗条 .....	21
3.7	月相示意图 .....	22
3.8	阿波罗 8 号在月球轨道上拍摄的地月合影 .....	23
3.9	火星逆行示意 .....	25
3.10	地内行星相对太阳视运动示意图 .....	26
3.11	地外行星相对太阳视运动示意图 .....	26
3.12	2012 年的金星凌日 .....	27
3.13	水星假彩色影像 .....	28
3.14	“水牙” .....	28

3.15 明亮的金星,在水面上投射出了迷人的倒影 .....	29
3.16 2004年上半年金星相位的变化情况 .....	30
3.17 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 .....	30
3.18 木卫一 Io 影凌木星 .....	31
3.19 木星的四颗伽利略卫星 .....	32
3.20 一般的望远镜中木星及其卫星应该呈现的样子 .....	32
3.21 土星 .....	32
3.22 天王星和海王星 .....	33
3.23 新视野号探测器拍摄的冥王星。图片来源:NASA .....	34
3.24 小行星带 .....	35
3.25 彗星 C/2014Q2 (Lovejoy) .....	36
4.1 日食的成因 .....	37
4.2 月食的成因 .....	37
4.3 日食的过程。其中阴影表示月影。 .....	38
4.4 月食的过程 .....	39
4.5 流星成因示意图 .....	41
4.6 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 .....	42
4.7 2020年双子座流星雨 ZHR 图示 .....	43
4.8 天宫号空间站过境星图 .....	45
4.9 天宫号空间站凌日 .....	45
6.1 日行迹 .....	53
6.2 世界时区图。 .....	55
6.3 浑仪实物图 .....	63
6.4 浑仪原理图 .....	63
7.1 蟹状星云(M1) .....	73
7.2 全部的梅西耶天体 .....	74
7.3 昴星团(M45)和武仙座球状星团(M13) .....	75
7.4 “创生之柱” .....	77
7.5 加利福尼亚星云(NGC 1499,发射星云)和马头星云(暗星云) .....	78
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) .....	79
7.7 哈勃星系分类法示意图 .....	80

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) .....	81
7.9	相互作用星系 NGC 4038 和 NGC 4039 .....	82
7.10	类星体 3C 273 .....	82
7.11	银河系剖面的示意图 .....	83
7.12	银河系结构示意图 .....	84
7.13	室女座星系团 .....	85
7.14	近邻宇宙中的超星系团结构 .....	86
7.15	斯隆数字化巡天(SDSS)发布的大尺度结构 .....	87
7.16	哈勃定律的拟合:星系的退行速度与距离大致成正比 .....	88
7.17	Planck 卫星探测到的宇宙微波背景辐射 .....	89
7.18	今天宇宙的组成成分 .....	89
7.19	宇宙演化史图示 .....	90
8.1	两种火箭的尾焰 .....	96
8.2	液体火箭与固体火箭的结构简图 .....	97
8.3	世界知名火箭(①—⑦) .....	99
8.4	中国长征系列运载火箭图谱 .....	100
8.5	海王星上的卷云 .....	102
8.6	旅行者 1 号拍摄的木星大红斑 .....	103
8.7	在地面测试阶段的伽利略号 .....	103
8.8	卡西尼号经典摄影作品:The Day the Earth smiled .....	104
8.9	惠更斯号拍摄的土卫六地表 .....	104
8.10	好奇号火星车经典角度的自拍 .....	105
8.11	机智号火星直升机 .....	105
8.12	嫦娥二号拍摄的图塔蒂斯小行星间隔成像照片 .....	105
8.13	嫦娥四号 .....	106
8.14	玉兔二号月球车的影子 .....	106
8.15	祝融号传回的火星影像 .....	107
8.16	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。 .....	108
8.17	美国第一次载人航天任务,阿伦·谢泼德升空瞬间。 .....	108
8.18	冯布劳恩与土星五号巨大的 F1 发动机合影 .....	109
8.19	阿波罗 11 号指令与服务舱和登月舱分离时两舱互拍照片 .....	110
8.20	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 .....	110

8.21 N1 火箭 .....	112
8.22 哥伦比亚号 STS-1 任务首秀 .....	113
8.23 挑战者号航天飞机发射阶段爆炸 .....	114
8.24 哥伦比亚号航天飞机再入大气层时解体 .....	114
8.25 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。这是这只钢铁巨兽的第一次航行,也是遗憾的最后一次。 .....	114
8.26 国际空间站 .....	115
8.27 STS-116 任务的宇航员进行太空行走,安装衍架有关设备 .....	116
8.28 2021 年 7 月 29 日拍摄的“崭新”科学号实验舱 .....	116
8.29 地面的火苗与国际空间站的火苗对比 .....	116
8.30 天和核心舱地面测试与发射 .....	118
10.1 1993 年北京天文台李竞老师作以“超新星”为主题的讲座 .....	130
10.2 1995 年天文科普周的日食观测 .....	131
10.3 2002 年北大清华天文知识竞赛 .....	132
10.4 2010 年的全国天文社团发展论坛 .....	133