

异星杂谭

苑明理

2021 年 4 月

异星杂谭

苑明理

© ⓘ ⓘ

序言

幼时夏夜，在屋顶乘凉，仰望壮丽的星空，时而会有一些遐想：在某个闪亮的星星附近，是否也有另一个“我”，同样在仰望星空，同样在发问？后来读到 Ted Chiang 的《你一生的故事》，深为外星异质文化带来的观念冲击而着迷。为什么呢？因为人们可以通过不同来重新审视自己。

我们常常藏身于观念的硬壳里，很多观念创建已久，已经成为我们每个人思考的一部分；当我们说到它，仅仅一个熟知的词汇脱口而出，压根没想它真正的意义。当重新尝试用观念创造者的角度来思考时，我们才恍然发现一个个想法的背后，对它们的思考并不是那么简单。不同会促使我们反省僵化的思维。

古时，庄子作出了一篇篇寓言，扬雄写了《太玄》与《法言》，这些著作或许有作者的深意；今人即使不认同这些背后的想法，但也不得不惊叹古人各种不同的瑰奇想象。想象可以通过小说来表达，却重在情节而失之知识的严谨；知识可以通过严谨的论文来表述，可缺少了情趣与浪漫。



图 1：横亘天际的银河

在这本小册子里，我将带领大家开启一段独特的浪漫之旅，尝试通过适当的假设、数学物理的原理、计算机的模拟，去勾画一个想象中的、包罗万象的行星世界。这个行星世界和地球的设定略有不同，而有趣的也在这些不同之处。我们会探索如下的方面

- 运动的星体：基于星体运动规律展开的讨论，如宜居性、天文事件、相应的几何关系、昼夜晨昏、四方位、可能的历法等；
- 再造行星世界：基于对行星表面物理机制的建模而展开的讨论，星球的形态、潮汐的强度、大气的分层与环流等；
- 重建生物圈：基于我们对地球生命的认知，去想象可能的演化过程、形态特征、生态组合，以及背

后可能的潜在规律；

- 神秘的智能：地球上生物智能如何体现？定义智能的尝试；和计算、学习的关系；自我与智能；智能之间能理解吗？
- 另辟蹊径的文化：用人类历史上在数制、逻辑、语言方面已经展现出来的多样性来打破我们僵化的惯性思维。
- 文明的其他可能：生物世界里群体如何相处？人机共存的赛博世界的可能未来？
- 终极的命题：宇宙是一个计算机吗？宇宙的演化有没有方向？有没有终极的意义？

我们将会准守如下的体例。在每个章节，我们会尝试尽量用这样的顺序：先确定出一些基本的问题，比如一个行星上的山最多有多高；然后把解决它们的文献资料里的原理给出，有些会进一步给出计算机的模拟；如果有可能，也会给一些科学史上的探讨；在这中间，会适当展开小的讨论，或许会有一些吉光片羽的感悟零散其间。在章节的中间，每次重要概念的第一次出现，我们会给出到维基百科的链接，方便读者的扩展阅读。在章节的结尾，我们会罗列出本章的参考文献，让感兴趣的读者进一步去探索；有计算机模拟的，我们会给出相应的模拟程序的链接。

这本介于虚构和非虚构之间的小册子，将会致敬刘慈欣的一篇不那么出名的小说《山》，一个新的望洋兴叹的寓言故事。在这篇不长的小说里，我们的大刘描述了一个生活在行星地核里的文明，他们乘着“泡船”在大地里航行，开始了他们的探索；经过了纷乱、战争和磨难，经历了十万年，他们终于凿空了整个厚厚的大地，越过了海洋，看到了星光闪烁下的夜空；于是，他们知道了，还有一个更大的宇宙在等待他们。这个“凿空厚壁，得见星空”的艰难，并不单单指小说设定里的那个厚厚的地层，也指人们每次认识突破中的困苦，或者说，突破旧有自我的种种艰辛。

这本小册子的写作注定是非常难和长期的，对写作者是一个不小的挑战。为此，多年来我也准备了很多的资料。有些问题，我的资料已经备足了，有些还会在写作中继续搜集。其中的有些题目下的内容，来自于多年工作里攻坚过程中学到的，这些内容我有把握会发挥的比较好，只是如何穿针引线组织起来，还要费一番心思。也有些题目看似简单，却是源自我长期以来的一些困惑和思考，我会争取把里面的精彩写出来，因为很多都早已被大家遗忘了。

我常常觉得，很多时候困惑反倒让我踏实，因为困惑的我不是翘尾巴的我；而且笨拙的我，往往是经过一串长长的探索，才发现了一个简单的道理；不过，接下来的就是真正的奖励，解决一个小问题带来的喜悦。

回顾自己的成长，有趣的普及读物总是能给我们开启大门，让我们走的越来越远。为什么呢？因为我们感受到写作者内心里一种单纯的小小执念—热爱或者好奇。这小小的单纯执念，对一个人来说，它们没有被岁月磨灭，反而会带来快乐；对我们人类来说，则如永不枯竭的涓涓细流，也似薪火一般永传。

横亘在窗外的万古银河，早被喧嚣城市的灯光掩盖，我们常常会扪心自问此身何往？或许唯有简单与纯粹，才能让我们看到本末源流，经历一番探索追寻，才能在苦难中到达彼岸。

这本书的写作还要感谢家人、朋友们的支持，他们的爱和友谊让我觉得不再孤单。尤其是集智这个小团体的朋友们，他们对未知的好奇心，他们的热忱，时时在感染激励我。

最后，我还想说，这本小书想达成什么呢？仅仅是想为成长中的青少年，开启一扇可以望见星空的窗，去感受外面广袤的宇宙和无限的可能。这是笔者在写这本书时想到的，以此为序。

2020年7月季夏

明理于北京

目录

1 人类对宇宙的认识之路	1
1.1 回望求索之路	1
1.1.1 远古的探寻	1
1.1.2 古典时代	2
1.1.3 文艺复兴	3
1.1.4 近现代的探索	5
1.2 巨石阵背后的数学	6
1.2.1 历法、逼近和连分数	6
1.2.2 神谕机与可学习	7
1.3 从第谷的大数乘法说起	7
1.4 开普勒到牛顿的飞跃	7
2 运动的星体	11
2.1 运动方程	11
2.2 方程的解算	11
2.3 天球系统	12
2.4 宜居性	12
2.5 四方位	12
2.6 昼夜晨昏	14
2.7 年	14
3 再造行星世界	17
3.1 大陆与海洋	17
3.2 温室效应	18
3.3 气温的纬度分布	19
3.4 大气环流	19
3.5 海气耦合	19
3.6 理想大陆	19
3.7 季节	19
4 重建生物圈	23
4.1 生命与演化	23
4.2 尺度的大小	23
4.3 植物和形态	23
4.4 动物、形态和行为	23
4.5 生态带	23
5 神秘的智能	27
5.1 生物学的视角	27
5.2 物理学的视角	27

5.3 数学的视角	27
6 另辟蹊径的文化	31
6.1 数制	31
6.2 逻辑	33
6.3 历法	33
6.4 文字	33
6.5 知识	33
7 文明的其他可能	37
7.1 市场	37
7.2 城市	37
7.3 国家	37
8 终极的命题	41
附录	45
A 习题解答线索	47

第 1 章

人类对宇宙的认识之路

人类是地球上唯一骄傲地懂天文学的物种吗？让我们从这样一个好笑的设问开始这本书。

我们经常可以在媒体上看到，满月时海龟会回游到出生地产卵，然而查阅文献，我们就能发现满月和海龟的回游与导航机制之间并不存在因果关系。相对高等的海龟不会看月亮，但是相反，倒是有一种滚粪球的夜行屎壳郎（蜣螂）会识别夜空里的银河和亮星，通过它们来给自己导航。

在本章，我们会简单回望人类对宇宙之真的求索之路，同时聚焦这历程中的几个小环节，看一下古人发展出来的技术。从这些技术问题的探讨，会引出一些话题，在更后面的章节我们还会反复讨论。

1.1 回望求索之路

1.1.1 远古的探寻

自古以来，天空中的日、月、星辰引发了人们无尽的想象和探究。1999 年人们在德国发现了内布拉星象盘（Nebra sky disk），它是公元前 16 世纪青铜时代的器物。在这个铜盘之上同时出现有太阳、月亮和星辰。根据一种解释，该盘上太阳和月亮之间的那团七星，是著名的金牛座“七姐妹”一昴宿星团。内布拉星象盘艺术式地表现了人们对宇宙的思考与追寻。^[2]



图 1.1：内布拉星象盘

然而，人类对宇宙的追寻并不只停留在艺术表现，更在于能够精确预测天文现象。根据一种假说，建于公元前两、三千多年前的英国巨石阵（Stonehenge）可以用来定位日月的位置并预测日食的发生。预测方法是使用巨石阵内 56 个奥布里洞（Aubrey holes）来实现的，它的原理是基于用公分子 56 来近似表达三个天文周期。

这三个天文周期分别是太阳的运动周期（地球的周年运动）、月球的运行周期和沙罗周期，它们的周期和近似的分数表示如下表所示。于是我们可以把沙盘的圆周等分成 56 份，然后在上面简单地计数，来模拟日、地、月的运行。并且这些模拟可以不断通过观测来校正，这样使得整个预报系统能够长期相对精确地运行。^[1]

天文现象	周期	近似周期	沙盘移动方法
太阳的运行周期	365.26 天	$56 \times \frac{13}{2}$	每 13 天移动 2 步
月球的运行周期	27.32 天	$56 \times \frac{1}{2}$	每天移动 2 步
沙罗周期	18.61 年	$56 \times \frac{1}{3}$	每年移动 3 步

表 1.1：基于 56 的日食预测原理

下图是设想中的巨石阵预测方法：在 56 个奥布里洞上插入 4 把旗帜，有两把分别代表日、月，另外两把代表沙罗周期，人们可以据此模拟日月运行和食变。代表太阳的旗帜，每 13 天逆时针移动 2 个洞；代表月亮的旗帜，每天逆时针移动 2 个洞；代表沙罗周期的两把旗帜，相互在对方的对径点上，每年顺时针移动 3 个洞。当这些旗帜彼此接近的时候，就有可能发生食变。

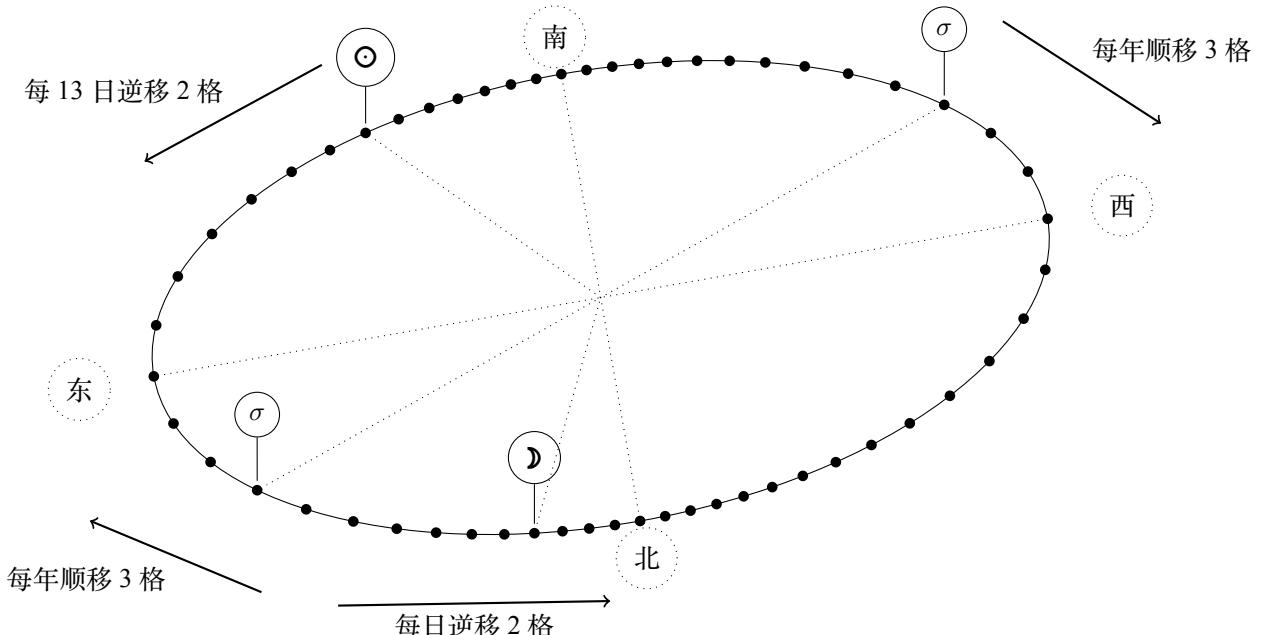


图 1.2：设想中的巨石阵预测方法

在上述假设下，巨石阵可以理解为一种称为计数器机^[1]的计算设施。

1.1.2 古典时代

在人类科学与技术史上，古希腊人制造的安提基特拉器械（Antikythera mechanism）无疑是古代的一个巅峰之作。它是古希腊人为了定位日、月和各大行星而设计制造的一个青铜器械。该器械约在公元前 150 到 100 年之间被制造出来，迄今已有二千余年的历史。它所体现出来的复杂设计与制造技能，失传于历史长河之中，直到后世欧洲于 14 世纪制造出了天文钟后，人类才重新获得了这样的能力。

1900 年 10 月，安提基特拉器械在希腊安提基特拉岛海岸外的沉船中被发现，它随同大量的考古遗物和艺术品一起被打捞上来。1902 年考古学家在整理考古遗物时发现了它的特殊之处。考古学家一开始认为



图 1.3：巨石阵（图片来自于维基共享资源计划）



图 1.4：安提基特拉器械（图片来自于维基共享资源计划）

这个器械是一种天文钟，但当时多数学者认为它太过复杂，远超同时期发现的其他物品，因此认为这里存在某种时代错乱，是后世的物品混进了这批考古遗物中。直到 1951 年，英国物理学家德瑞克·约翰·德索拉·普莱斯 (Derek J. de Solla Price) 对该器械进行了系统性的研究，提出该器械通过齿轮组实现行星和恒星运动的模拟。其后科学家进行了多次系统的调查，进一步确认了普莱斯的观点。

安提基特拉器械详细的 X 射线成像表明，它共有 37 个齿轮，能够模拟月球和太阳的运动、预测日食，甚至可以模拟月球的不规则运动。在公元前 2 世纪，曾在罗得岛居住过的天文学家喜帕恰斯 (Hipparchus, 约公元前 190 年-公元前 120 年) 研究了这种月球的不规则运动，因此人们推测他可能参与了机器的制造。人们也怀疑，这台器械的原产地也在当时的天文学和机械制造的中心罗得岛。

人们认为希帕恰斯是古代最伟大的天文学家之一。在洛杉矶的格里菲斯天文台前，有一座天文学家纪念碑，碑上有六位有史以来最伟大的天文学家的浮雕，希帕恰斯是唯一来自古代的人选。他发明或改进了一系列天文仪器；建立了日月运行的精确理论，从而能更好的计算日月食；在古巴比伦人工作的基础上编制了星表，并且发现了岁差；同时希帕恰斯也是重要的数学家，他是三角学的奠基人。

1.1.3 文艺复兴

尽管希腊人已经发展了多种不同的宇宙理论，但在古代很长时间里大多数人认为“地球是宇宙所有运动的中心”。这个命题赋予了地球无比特殊的地位。然而即便是在中世纪也有人对此产生异议。尼克尔·奥里斯姆 (Nicole Oresme, 132? 年-1382 年) 是欧洲中世纪晚期的哲学家，他在神学著作中表达了上帝之

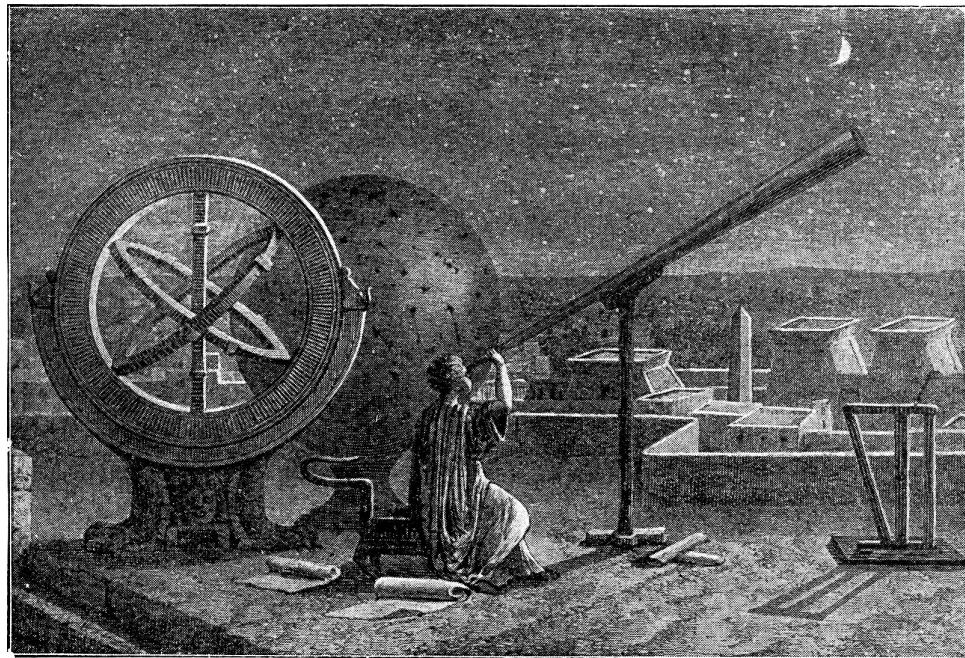


图 1.5：描绘希帕恰斯在亚历山大观星的插图

下的众多不同世界的可能。

其后的历史，欧洲进入了文艺复兴。1543 年，天文学家尼古拉·哥白尼（Nicolaus Copernicus, 1473 年 - 1543 年）在去世之前，发表了著名的《天体运行论》，提出日心说。这一年被认为是现代天文学的起点。在《天体运行论》发表之后的几十年里，哥白尼的观点在欧洲不断传播。

1609 年伽利略制作了他的第一台天文望远镜，1610 年 3 月他把最初利用望远镜观测天体的结果发表在题为《星际信使》的书中。1610 年 1 月 7 日，伽利略通过他的天文望远镜观察到了木星周围的三个小的天体，随后几天，他又观察到这几个小的天体相对于木星的运动，甚至遮掩；由此，他发现了木星的三个较大的卫星。这些发现揭开了天文学的革命。



图 1.6：哥白尼、伽利略、第谷

在这些早期的日心说支持者中，最有贡献的是丹麦天文学家第谷·布拉赫（Tycho Brahe, 1546 年 - 1601 年）。第谷在天文学上的贡献，除了他的第谷体系之外，他还于 1576 年在汶岛（Hven Island）建立了天文台，从事大规模的天文观测。第谷的观测材料为他的学生约翰内斯·开普勒（Johannes Kepler, 1571 年 - 1630 年）的工作开辟了道路。

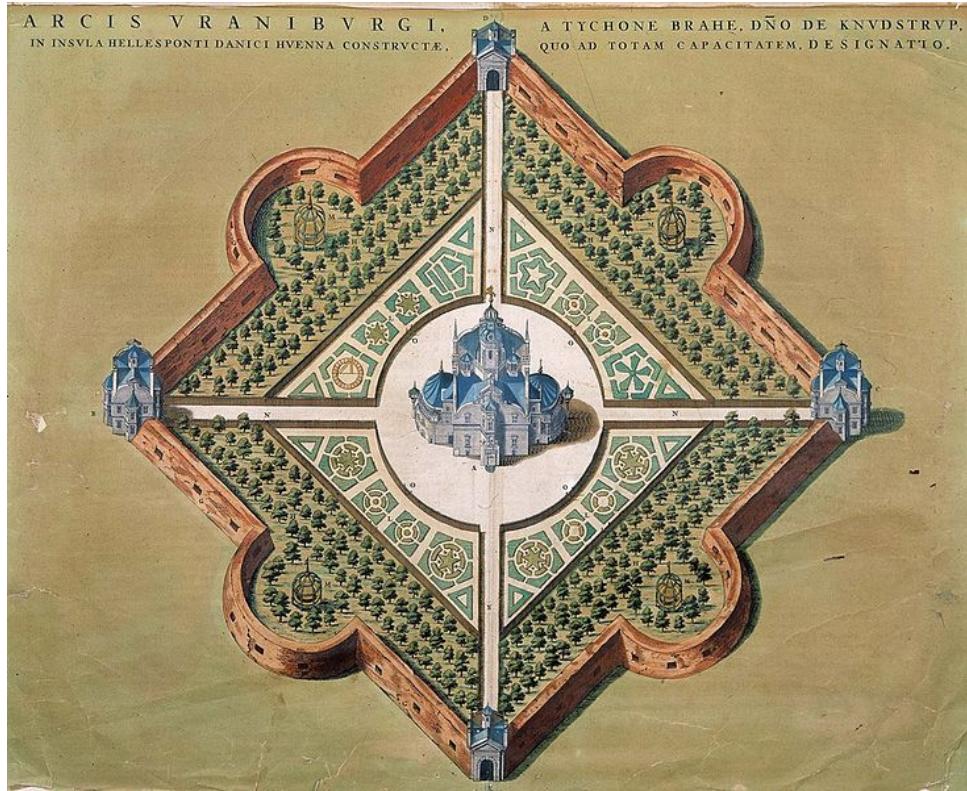


图 1.7：第谷建立的天文台（图片来自于维基共享资源计划）

1.1.4 近现代的探索

从开普勒对行星运动的研究开始，人类对宇宙的探索进入到了下一个阶段，其后的路径大致可以分对自然的深度和丰富性的两条认识之路。

对自然的深度认识之路，始于开普勒在 1602 年至 1618 年间建立的行星运动三定律，它们用精密的数学描述了行星的运动。艾萨克·牛顿（Isaac Newton，1643 年- 1727 年）更进一步，于 1687 年在《自然哲学的数学原理》中正式发表了万有引力的平方反比律；在此基础上，几代天文学家，如拉格朗日、拉普拉斯、高斯、庞加莱，陆续建立了庞大的天体力学体系，帮助人们更好地理解和探索宇宙。在二十世纪初，相对论、量子理论分别突破物理学的困境，开启了人与自然的全新时代。

对自然的丰富认识之路，可以从弗里德里希·威廉·赫歇尔（William Herschel，1738 年- 1822 年）的工作说起，他于 1781 年发现了天王星，是从古代以来，人类首次发现新的行星。赫歇尔还通过观测和统计，对银河系形状建立了初步的认识。1838 年，弗里德里希·威廉·贝塞尔（Friedrich Bessel，1784 年- 1846 年）第一次利用视差确定了太阳系到恒星天鹅座 61 的距离。通过 1920 年前后的“沙普利-柯蒂斯之争”，人类确立了仙女座大星系的河外星系地位。埃德温·鲍威尔·哈勃（Edwin Powell Hubble，1889 年- 1953 年）更利用造父变星确认了河外星系的普遍存在。他还发现了河外星系的红移与距离的关系，也就是著名的哈勃定律，人类更清晰的认识了宇宙膨胀的宏观运动。1964 年美国射电天文学家阿诺·彭齐亚斯（Arno Penzias，1933 年- ）和罗伯特·威尔逊（Robert Wilson，1936 年- ）偶然发现宇宙微波背景，为宇宙大爆炸理论提供了观测证据。

尽管人类对宇宙的理解取得了很多进展，但仍然有许多问题没有解决，暗物质与暗能量的问题是其中之一。

人类对自然认识水平的提升，反过来也会改变人类对自己的认识。随着光学观测水平的提升，观测方法的创新与改进，开普勒卫星已经观测到几千颗地外行星，而这仅仅来自很小的一块天区。这些发现使人们相信行星的普遍存在，也蕴含着生命在宇宙里普遍存在。二十世纪末叶，有科学家认为，宇宙的存在是多重的，不止一个，每个宇宙都有自己的演化参数和历史。根据人择原理，人类所处的这个宇宙的参数，必须能说明人类自己的存在。

1.2 巨石阵背后的数学

万事万物都发生在一定的时空当中，人类时间观念的建立，会天然倾向于和身边稳定时间周期的事件联系起来：日升月落，斗转星移，在人类历史早期，最容易找到的稳定时间周期的事件就是天文事件。不同类型的天文事件有不同的时间周期，于是历法里的很多问题，都遵循如下的模式：首先假设天文事件时间周期的恒定性；再在对它们时间测量的基础上，进行恰当的逼近；然后，校验测量误差，检验假设，再在此基础上，修正先前的假设。设想中的巨石阵预测方法就体现了这样的想法，本节我们对假设、观测、逼近、修正的想法做更多的讨论。

1.2.1 历法、逼近和连分数

早期人类可以在简单观察的基础上，建立朴素的日、月、年的概念；但是随着理解的深入，伴随不同的参考框架，使用不同的测量方案和定义方法，日、月、年的朴素概念会衍生出多种不同的精确形式。下面给出两组重要的定义。

- 恒星日：相对于背景星空，地球的自转一周的时间，它可以通过测量某一恒星两次过中天的时间来确定；测定为 23 小时 56 分 4 秒（23.9361 小时）。
- 恒星月：相对于背景星空，月亮回到同一位置的时间；它的平均值测定为 27 日 7 小时 43 分 11 秒（27.321661 日）
- 恒星年：相对于背景星空，地球的公转一周的时间；测定为 365 日 6 小时 9 分 10 秒（365.242190402 日）。
- 太阳日：在地球上某一地点，观察太阳两次过中天的时间；因为地球围绕太阳运动的不均匀性，太阳日也呈现不均匀性，但它全年的平均值被设定为 24 小时。
- 朔望月：在地球上观察月亮的月相，月相是由地球、月亮和太阳的相对位置决定，可以简单认为两次相同月相之间间隔的时间就是朔望月；它的平均值被测定为 29 日 12 小时 44 分 3 秒（29.530588 日）。
- 回归年：又称太阳年，是在地球上观察太阳两次过黄道上同一点的时间；测定为 365 日 5 小时 46 秒（365.242190419 日）。

$$356 + \frac{5}{24} + \frac{48}{1440} + \frac{46}{86400} = 365 \frac{10463}{43200}$$

历法往往有几个不同的时间周期组成，通过一些特殊的设置，来保证这些不同周期之间的协调性。比如，日、年和季节的关系是不能错乱的，否则人们无法顺利的安排生产和生活。历法里这些特殊的设置，一

般是通过在不同时间周期上置闰的做法来进行的。这里描述的基本原理虽然很容易，但一旦从朴素想法落实到精确地测量和计算，就会发现实际的处理并不简单。

策略：从这个比例，我们大致可以看出每 4 年要设一个闰年，这样是 365 天 6 小时；所以只这样设置又会多一些，每 4 年会多出来 11 分 14 秒，于是大约 120 年会积累到接近 1 天，需要扣除；如此往复，累积误差够一天就去增损天数；但上面的算法是最佳的逼近策略吗？

连分数概念的引入

Euclid 算法

最佳逼近定理

1.2.2 神谕机与可学习

神谕机

可学习性

学习的层次

1.3 从第谷的大数乘法说起

1.4 开普勒到牛顿的飞跃

参 考 文 献

- [1] E. J. Beggs, J. F. Costa, and J. V. Tucker. Unifying science through computation: Reflections on computability and physics. In *Special sciences and the unity of science*, pages 53–80. Springer, 2012.
- [2] E. Pasztor and C. Roslund. An interpretation of the nebra disc. *antiquity*, 81(312):267–278, 2007.

第 2 章

运动的星体

最基本的问题有哪些?

星体间几何关系的变化导致的事件序列关系。

宜居性?

2.1 运动方程

下面我们先从星体的动力学方程开始讨论。我们指定两颗恒星的下标分别是 1、2，行星的下标为，于是三个星体的质量分别是 m_1 、 m_2 、 m_3 ，位置分别是矢量 \mathbf{x}_1 、 \mathbf{x}_2 、 \mathbf{x}_3 ；因为行星质量 m_3 远小于两个恒星的质量，可建立如下限定性三体问题的运动方程：

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{x}}_1 = Gm_2r_{12}^{-2}\mathbf{e}_{12} \\ \ddot{\mathbf{x}}_2 = Gm_1r_{21}^{-2}\mathbf{e}_{21} \\ \ddot{\mathbf{x}}_3 = Gm_1r_{31}^{-2}\mathbf{e}_{31} + Gm_2r_{32}^{-2}\mathbf{e}_{32} \end{cases}$$

其中 r_{ij} 为星体 i 和 j 之间的距离， \mathbf{e}_{ij} 为星体 i 和 j 之间的单位方向矢量。

2.2 方程的解算

三体系统很多情况下是不稳定的，常常会有一颗星体被抛射到无穷远处。下图便是三体系的一个著名例子—毕达哥拉斯三体问题的轨道演化图。两颗质量较大的星体相互围绕旋转下行，而质量最小的第三颗星体则被甩出，沿着双曲线上行。

毕达哥拉斯三体问题

我们问题的运动方程建立之后，便可以数值求解这个二阶常微分方程。理论上讲，我们忽略了行星的质量，会让系统的稳定性提高很多。我们用最常用的数值求解方法—龙格库塔法 [6] 求解了该问题；但发现由于误差的积累效应，整个体系不保持能量守恒；于是，大多数情况下，三星体体系不稳定，行星会很快被抛出双星系。

这种不符合能量守恒的计算解中的能量变化，被称为能量漂移（Energy drift）。为了消除能量漂移，人们引入了辛方法来计算此类问题。辛方法会保持系统的能量守恒。我们在这里则采用了一种二阶的辛方法 Verlet 积分。采用 Verlet 积分方法之后，我们就很容易计算出一条稳定的轨道了。

2.3 天球系统

为了更好的陈述后面几节，我们将讨论天球系统，我们以地球的天球系统为基础展开讨论。

天球是一个假想的以行星地心为球心的几何球面，行星自转导致恒星（母星和背景星空）在天球上有以天为单位的周日运动，行星的公转导致恒星在天球上有以年为单位的周年运动。

地球天球的示意图

地球上天球的主要几何元素包括：

南、北天极：它们的指向长时间稳定赤道面：以极轴为法线的大圆面黄道面：本系统恒星周年运动所在的平面黄赤交角：数值上等同于行星的自转轨道倾角

以上几何元素在瓦克星上依然成立。不一样的地方在于，黄道上有两颗母星沿着它运动。和地球类似，恒星的周日运动依然存在；但周年运动则大相径庭，两颗母星的周年运动轨迹比较复杂，我们在后面章节仅作简单讨论，更多结果有待进一步研究。

2.4 宜居性

我们以液态水的稳定存在作为行星的宜居条件，可以做如下最为粗略的估计。假设母星为黑体且表面温度分别为 T_1 和 T_2 ，母星的半径分别为 R_1 和 R_2 ，瓦克星的行星反照率为 α ，半径为 R_3 ，视瓦克星为黑体且表面温度为 T_3 ，可以建立如下方程：

$$(1 - \alpha) \left(\frac{4\pi R_1^2 \sigma T_1^4}{4\pi r_{13}^2} + \frac{4\pi R_2^2 \sigma T_2^4}{4\pi r_{23}^2} \right) \pi R_3^2 = 4\pi R_3^2 \sigma T_3^4$$

化简即得：

$$T_3 = \left[\frac{1}{4} (1 - \alpha) \left(\frac{R_1^2}{r_{13}^2} T_1^4 + \frac{R_2^2}{r_{23}^2} T_2^4 \right) \right]^{\frac{1}{4}}$$

对地球而言， α 取值在 0.3 附近。

考虑到大气层的温室效应，我们只要令 T_3 保持在 0 附近即可。

虽然这里宜居条件的估计涉及行星表面的物理机制，但最终化简的公式里，只保留了一些纯几何量的简单对比。所以，我们仍然把宜居问题的粗略估计纳入到恒星系建模的范围里。

2.5 四方位

方位感是人类内在生物机制。可是空间上的秩序并非空间自有的属性，是人类叠加到物理世界上的。可以说四方位、地名的概念是人类发明的最早的增强现实（Augmented Reality）的技术了。

从苏州地区的夜间卫星地图中的灯光可以看出，城市的街道格局是沿着东、西、南、北四个方向展开的。这其中的原因是因为在温带房子南北布局才能充分获得阳光。



图 2.1：国际空间站拍摄的城市夜景（图片来自于维基共享资源计划）

可以说，太阳的光和热深深的渗透到我们文化的底层。在我们的大多数文化里，东、西、南、北四个方位是在儿童时期便教育给下一代的基本概念，我们会借助于太阳东升西落或者房屋、街道的布局来表达它们。然而，仔细考究四方的严格定义，必须得对日月星辰的运行有透彻的理解才可以。而因为这些基本概念潜入、物化在我们文化的各处，我们也往往忘记了这些基本概念的来源。瓦克星则给我们一个反思的机会。

当我从新思考瓦克星环境里的四方概念时，走了一段弯路，才意识到四方概念的本质。

东、西：地球上是太阳在春秋分东升西落的方位；然而瓦克星的春秋分的时间如何精确定测？南：正午的太阳位置、立杆影子最短、太阳的光强最大的位置；然而有两个太阳，如何处理？北：地球是北极星的位置；然而如果瓦克星没有北极星，那怎么测北？

似乎确定每个方向都会遇到一些问题。

我从南开始入手，写了数值模拟程序，看温带房子哪个方位布局才能最大获得阳光。我希望能看到一个不一样的结果，然而结果就是和地球一样的正南方。

由此，我才恍然大悟：自转轴相对保持恒定，这是四方概念成立的根源；所以，“北”是本质性的，其他三个概念都可以导出。

当然，瓦克星上还是有和地球不一样的地方。

比如，和四方联系的分至四时，在地球上会和昼夜平分、极昼、极夜现象联系起来。我们考察瓦克星时发现了一个奇特现象——双极昼现象。

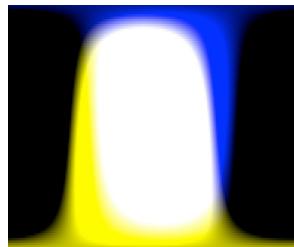


图 2.2：瓦克星上的双极昼现象

我们可以清楚看到，瓦克星南北两极都处于极昼。

2.6 昼夜晨昏

昼夜现象是由三颗星体和行星的旋转轴之间的相对几何关系确定的。容易想见在行星的球体表面上，每一个母星都对应一个昼夜变更的大圆，它们对应圆面和的法线方向分别是和。容易看出是黄道面的法线。

对比于昼夜现象的时间周期，我们可以不考虑岁差现象 [11]，如同地球上的北极指向长期保持在北极星附近，瓦克星的旋转轴也是长期相对稳定的。赤道面的法线就是旋转轴。

将以上关系编程就可以很容易模拟出瓦克星上的昼夜现象。那么瓦克星上的昼夜现象有什么特别的吗？通过模拟我们发现，一年中会有短暂的几天时间，瓦克星的南北两极同时处于极昼之中。这和地球大相径庭，地球上南极处于极昼，则北极处于极夜，或者反之。

2.7 年

正东、正西方位可以从正南、正北方位推导出来。但在地球上与此有关的概念还包括分至四时—春分、夏至、秋分、冬至；在地球的各大文化里，这四个时间点往往有重要的天文与文化含义。

在春秋分点，全球昼夜平分，太阳从正东升起、正西落下，太阳直射赤道；在夏至点，北半球那一天白昼时间最长，太阳升起和落下点位置最偏北，中午立杆的影子最短，太阳直射南回归线；冬至点则有类似的对偶现象。

那么瓦克星上会怎么样呢？容易理解的一点是，大多数周期性不再简单保持了。但更加透彻的理解这类问题，需要我们完整建立瓦克星的天球系统。天球系统以背景星空为基准，然后确定各个星体在天球上的运动方式。当特定的几何关系出现时，就发生一定的天文事件。我们简单罗列一些容易观察到的事件：

母星沿着黄道运动到黄赤交点，此时母星直射赤道、正东正西起落，昼夜平分某个母星对应白昼时间最长的正午时间点，此时这个母星直射某条回归线，中午立杆的影子全年最短。两个母星的视夹角为 0 的点，此时发生食变两个母星的视夹角最大

所以这里有一个重要的理论问题—确定星体间的这些几何关系发生的先后关系和周期。

参 考 文 献

- [1] E. J. Beggs, J. F. Costa, and J. V. Tucker. Unifying science through computation: Reflections on computability and physics. In *Special sciences and the unity of science*, pages 53–80. Springer, 2012.
- [2] E. Pasztor and C. Roslund. An interpretation of the nebra disc. *antiquity*, 81(312):267–278, 2007.

第3章

再造行星世界

行星建模是涉及行星表面物理机制的建模过程。我们完成了地表特征的生成、估计温室效应和对大气现象的初步模拟。

最基本的问题有哪些?

星球的形态? 大陆与海洋

潮汐? 浪高

大气各参量的极值? 扰动形成的几何纹样? 几何纹样的破坏与建立? 洋流?

季节?

3.1 大陆与海洋

菱形方块算法 [18] 是常用的地表特征生成算法，它的常见形式是在一个方形区域上展开的。我们对它稍加变形，让它适应球面上地表特征生成的特殊需求。

如下图，标准的菱形方块算法反复执行如下两个大的步骤。

菱形方块算法的中心点生成

方块步骤：

取方块四角点的平均值作为中心点的基础值再在基础值上叠加一个反映粗糙度的随机值，该随机值与方块边长和粗糙度正相关

菱形步骤：

取菱形四角点的平均值作为中心点的基础值再在基础值上叠加一个反映粗糙度的随机值，该随机值与菱形边长和粗糙度正相关

两个步骤交错执行，会逐渐把方形区域密分填满。

我们在球面经纬网格基础上改造钻石方块算法，主要有四个要点：

最左经线和最右经线要粘合在一起，其上的对应格点取相同值最上的纬线是北极点，要粘合成一个点，该纬线上的格点取相同值最下的纬线是南极点，要粘合成一个点，该纬线上的格点取相同值不同纬线上

格点的间隔长度不等，与纬度的余弦成正比

算法中基础值会叠加一个随机的粗糙量，但实际模拟中我们寻求的是一个固定的地表特征，怎么解决这个问题呢？其实，只要采用确定性的伪随机数生成器 [19]，同时赋予生成器相同的种子（seed），就可以顺利解决问题。

下图就是我们生成出来的一幅瓦克星全球地形图。可以看到有两个大陆和两个大的岛屿。大陆上有山地、高原、平原等地形区别。当把地图按照相应的经纬度投影到球面之上，我们便得到了本文图（一）的瓦克星全球的俯视图，加上恒星照射产生的白昼和黑夜便得到了图（二）中的景象。

3.2 温室效应

本节我们用一个简化模型来估计瓦克星的温室效应。一方面，我们不考虑地气系统的纬向差异，认为系统参量只是纬度的函数。另一方面，我们假设瓦克星类似于地球，有相同的地气系统辐射平衡模式 [21]。

图（十）地球地气系统能量收支平衡示意图，图片来源于 NASA

我们设定和代表地表温度和大气温度，它们都是纬度和时间的函数。代表全球的平均大气温度。和分别代表母星一和二的入射短波辐射带来的能量。我们考虑下垫面 [22] 的物态变化，如是否结冰，它会影响反照率和比热容。

依据能量转移过程的不同，我们做如下讨论：

短波辐射的大气吸收：

短波辐射的地面吸收：

地面的长波辐射的发出：

大气长波辐射的发出：

长波辐射的大气吸收：

长波辐射的地面吸收：

地面和大气之间的热交换（热力泡和蒸发）：

由于不同纬度带之间温度差异，会带来大气热交换；一般而言，同一纬度带会有能量流入和流出，其净差我们可以设为：

上述公式中的参量可以通过和地球一样的假定值来获得。联立前面诸公式有

我们可以根据本式展开模拟。

3.3 气温的纬度分布

3.4 大气环流

将基本的物理定律应用于大气的运动，我们可以得到大气运动基本方程 [23]:

理论上，只要对上述基本运动方程差分化，我们可以直接应用最简单的欧拉法 [24] 来解算这个偏微分方程。我们这样做了，在经纬网格上展开了计算。在这个过程里遇到了一系列出乎意料但有意思的问题，这里我们仅举一个例子—极点问题。

在经纬网格里，极点被展成了 90° 纬线圈，从球面的一个内点转而变成了特殊的边界线。在解算偏微分方程时，我们需要引入什么样的边界条件才能表达极点的特殊性呢？

容易看到，对于极点上的标量，标量从一个点值变成经度的函数：

对于极点上的一个长度为沿着经度指向极点的向量，该向量也应该变成经度的向量函数，但该函数在经纬网格里应该取什么形式呢？假设向量属于球面上的一个连续向量场。对于极点附近的一个充分小的纬度圈，可以认为向量场在整个小纬度圈上保持向量不变，转换到经纬网格里有：

可以看到径线和纬线方向的分量值都和的大小无关。我们可以认为极点的情况作为的一种极限，采取和上式相同的形式。

我们的这个模拟在处理地面和大气的长波辐射方面还有一些缺陷，导致长期计算时系统发散，这些缺陷会在未来的计划里改进。这里只给大家展示我们的一部分模拟结果。

图（十一）模拟开始时刻 0 度经圈气温沿着高度的分布状况

图（十二）模拟一段时间之后 0 度经圈气温沿着高度的分布状况

上面两个图展示了，模拟开始和进行一段时间之后，气温沿着高度的分布状况。气温高的颜色是红色，气温低的颜色是蓝色。对比上面两个图可以发现，模拟开始时，地面长波辐射被近地大气层吸收，所以近地的气温高，而高空是冷的；然而系统演化一段时间之后，大气温度随着高度上升首先是出现逆变，高空中出现冷气层，渡过冷气层继续上升后，温度才开始上升。这恰巧和地球上的实际情况吻合，冷气层以下是对流层 [25]，冷气层以上是平流层 [26]。

3.5 海气耦合

3.6 理想大陆

3.7 季节

参 考 文 献

- [1] E. J. Beggs, J. F. Costa, and J. V. Tucker. Unifying science through computation: Reflections on computability and physics. In *Special sciences and the unity of science*, pages 53–80. Springer, 2012.
- [2] E. Pasztor and C. Roslund. An interpretation of the nebra disc. *antiquity*, 81(312):267–278, 2007.

第 4 章

重建生物圈

最基本的问题有哪些？

生命体的尺度与形态是什么样？生命体基于什么机制运作？是否有植物与动物的分野？生命体之间有什么样的连接关系？什么样的生态景观？

4.1 生命与演化

4.2 尺度的大小

我们先回顾地球生物的异速生长现象。异速生长律是实际测量到的一类幂率关系，它把生物体的尺度同其生理、生态特征联系起来。而这个观测到的幂率，往往不同于将生命体几何结构同构扩张后得到的理论幂率，故此称为异速生长。

文献中经常提到的异速生长现象包括：

体重和摄食率正相关，幂率为 0.7。体重和基础代谢率水平正相关，幂率为 0.75，称为克莱伯定律体重与内禀增长率负相关，幂率大约在 -0.27 左右

我们其实可以把异速生长律理解为一种高效的编码方式，仅仅尺度一个参数就决定了生理学和生态学的很多特征。

形态学信息：对植物来说，可以包括 L 系统的生长规则；对动物来说可以包括特征尺度、骨架结构、体重等行为学的信息：如最大奔跑速度生态学信息：内禀增长率、食谱组成等

4.3 植物和形态

4.4 动物、形态和行为

4.5 生态带

参 考 文 献

- [1] E. J. Beggs, J. F. Costa, and J. V. Tucker. Unifying science through computation: Reflections on computability and physics. In *Special sciences and the unity of science*, pages 53–80. Springer, 2012.
- [2] E. Pasztor and C. Roslund. An interpretation of the nebra disc. *antiquity*, 81(312):267–278, 2007.

第 5 章

神秘的智能

最基本的问题有哪些?

5.1 生物学的视角

5.2 物理学的视角

5.3 数学的视角

参 考 文 献

- [1] E. J. Beggs, J. F. Costa, and J. V. Tucker. Unifying science through computation: Reflections on computability and physics. In *Special sciences and the unity of science*, pages 53–80. Springer, 2012.
- [2] E. Pasztor and C. Roslund. An interpretation of the nebra disc. *antiquity*, 81(312):267–278, 2007.

第 6 章

另辟蹊径的文化

最基本的问题有哪些?

数制、逻辑是否是普遍的?

语言：基础词汇、语法范畴的人类学考察?

文字:?

6.1 数制

大约在 18000 ~ 20000 BC 的 Ishango 骨刻，是目前人们发现的最早和数目有关的考古实物，它处在刻痕记事的阶段。如果不考虑实物的形态，仅从抽象角度看，在这个阶段人们采用符号 1 的累记来表示更大的数目。这种方式在表示形式上极为繁杂，尤其对大的数目，几乎不具有实际的可行性。但凭借这种简单的记号，人们有了对数目概念的理解。



图 6.1: Ishango 骨刻（图片来自于维基共享资源计划）

在这个阶段，人们可以通过分堆的方法进行乘法运算。但这种方法仅仅限于小数目之间的乘法。

●	●	●	●	●
●●	●●	●●	●●	●●

表 6.1: 计算 3 与 5 的乘积

人类进入文明以后，有了对抽象符号更强的操作能力。在古埃及，人们发明了另外一种复杂的计数体系，它能表示整数、分数和相关运算。我们这里仅仅简单展示整数的表示和乘法运算。

组合上述的基本符号，古埃及人可以表达一些相对较大的整数。但古埃及人组合这些符号的方式，并没

数值	一	十	百	千	万	十万	百万
符号		o	ꝝ	ꝝ		ꝝ	ꝝ
描述	单竖线	踵骨	绳圈	水莲	屈指	蝌蚪	Heh 神

表 6.2：古埃及象形文字里的整数符号

有非常严格的方法：既可以从左向右，也可以从右向左，有时也会竖写。除此以外，古埃及人做乘法的方式，更加显示出他们的数制还处于一种早期形态。下图展示了古埃及人如何计算 11 与 35 乘积的过程。

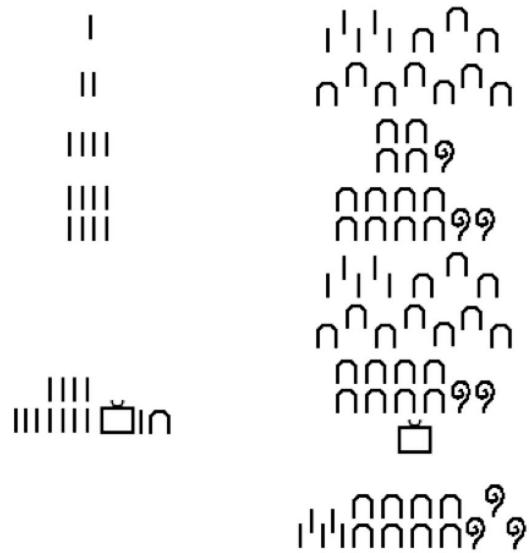


图 6.2：计算 11 与 35 乘积

在这种方法里，首先构造 2 的幂的序列 1、2、4、8……，同时 35 也按照 2 倍的关系相应扩大。然后可以看出，11 能被分解成为了 1、2、8 的和，所以只要把 35 倍数里的 35、70、280 累加就可以得到结果。

但是数制的更加成熟的形态是数位制。在许多古文明中，数位制都被发明出来，如古巴比伦的 60 进制系统、古印第安文明的 20 进制系统。对于乘法运算，中国古代很早就发明了九九乘法表，清华简中的“算表”作为考古实物依据，把发明年代至少向前推进到战国时代。十进数位制和九九乘法表结合在一起，人们能够完整的表达所有自然数，并计算任意自然数的乘法。当今，阿拉伯数字符号、十进数位制、九九乘法表都作为基础教育的内容，成为全人类分享的文明成果。

$$\begin{array}{r}
 & 2 & 3 & 9 & 5 & 8 & 2 & 3 & 3 \\
 \times & & & & & & 5 & 8 & 3 & 0 \\
 \hline
 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & 7 & 1 & 8 & 7 & 4 & 6 & 9 & 9 \\
 & 1 & 9 & 1 & 6 & 6 & 5 & 8 & 6 & 4 \\
 + & 1 & 1 & 9 & 7 & 9 & 1 & 1 & 6 & 5 \\
 \hline
 & 1 & 3 & 9 & 6 & 7 & 6 & 4 & 9 & 8 & 3 & 9 & 0
 \end{array}$$

表 6.3：竖式乘法的例子

6.2 逻辑

6.3 历法

历法是一种文化的计时方法，它也有服务于农业生产的目。由此我们有天文历和农业历的分别；前者依据天文现象的周期性来计时，后者依据气候现象的周期性来指导农业生产。

地球上太阳的周年运动决定了地球的光热条件，进而决定了气候现象大的变化，因此，对于地球的许多文化，天文历和农业历是吻合的。那么瓦克星上会有什么不同呢？

基于我们的数值模拟，我们先考察一些现象的周期性：

恒星的周日视运动保持相对稳定的周期，因此天的概念会得到保持。相对于背景星空，和行星公转相联系的周期是类周期的，因此年的概念需要修正。行星上最显著的天文事件是两颗母星的食变，但该类事件是类周期的。行星接收到的来自两颗母星的能量，有显著的年际变化，但存在一个以几年为跨度的类周期性。

因此，我们可以推测瓦克星的历法有如下几种类型：

星历：以背景星空为基准
食历：以两颗母星的食变为基准
农历：以气候周期为基准

这三种历法的基准都是类周期的，且周期各不相同，因此维护瓦克星的历法系统需要随时保持对各种星体的观测。三种历法中，食历和农历的确立基准比较易于观测，因此容易被原始一些的文化建立；而星历的建立则复杂的多。

6.4 文字

6.5 知识

参 考 文 献

- [1] E. J. Beggs, J. F. Costa, and J. V. Tucker. Unifying science through computation: Reflections on computability and physics. In *Special sciences and the unity of science*, pages 53–80. Springer, 2012.
- [2] E. Pasztor and C. Roslund. An interpretation of the nebra disc. *antiquity*, 81(312):267–278, 2007.

第 7 章

文明的其他可能

7.1 市场

7.2 城市

7.3 国家

参 考 文 献

- [1] E. J. Beggs, J. F. Costa, and J. V. Tucker. Unifying science through computation: Reflections on computability and physics. In *Special sciences and the unity of science*, pages 53–80. Springer, 2012.
- [2] E. Pasztor and C. Roslund. An interpretation of the nebra disc. *antiquity*, 81(312):267–278, 2007.

第8章

终极的命题

参 考 文 献

- [1] E. J. Beggs, J. F. Costa, and J. V. Tucker. Unifying science through computation: Reflections on computability and physics. In *Special sciences and the unity of science*, pages 53–80. Springer, 2012.
- [2] E. Pasztor and C. Roslund. An interpretation of the nebra disc. *antiquity*, 81(312):267–278, 2007.

附录

第 A 章

习题解答线索

参 考 文 献

- [1] E. J. Beggs, J. F. Costa, and J. V. Tucker. Unifying science through computation: Reflections on computability and physics. In *Special sciences and the unity of science*, pages 53–80. Springer, 2012.
- [2] E. Pasztor and C. Roslund. An interpretation of the nebra disc. *antiquity*, 81(312):267–278, 2007.