

“十一五”国家重点图书出版规划项目



空间时间生物学

主编 陈善广 王正荣



科学出版社

www.sciencep.com

“十一五”国家重点图书出版规划项目
国家科学技术学术著作出版基金资助出版

空间时间生物学

主 编 陈善广 王正荣

科学出版社

北 京

内 容 简 介

《空间时间生物学》是揭示生物体在空间时间条件下生物节律、时间结构、节律导引与工程的一部创学科开篇之作。本书是在多年载人航天发展的基础上,以现代生命科学,特别是生理学、分子生物学与现代生物技术的最新研究成果为基础,顺应载人航天技术发展的需要编写而成。本书系统地介绍了空间时间生物学的基础理论、体系结构和实验方法,阐述了载人航天外太空环境生物节律的生理基础、空间生物节律分子生物学机制、空间环境生物节律变化和导引及今后发展的方向和趋势等内容。本书对于人类在空间长时间逗留及对深空探测中所遇到的医学与健康维护问题进行深入研究具有重要的指导和促进作用。

本书可作为从事载人航天领域研究的科技工作者的参考书,亦可作为航空航天医学、空间生物学、时间生物学专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

空间时间生物学 / 陈善广,王正荣主编. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023384-4

I. 空… II. ①陈… ②王… III. ①航天生物学-研究 ②时间生物学-研究 IV. Q

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 176911 号

策划编辑:黄 敏 / 责任编辑:黄相刚 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平 / 封面设计:黄 超

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009年1月第一次印刷 印张:25 插页:8

印数:1—2 000 字数:596 000

定价:98.00 元

如有印装质量问题,我社负责调换

前言

现代载人航天技术将人类活动的疆域拓展到外层空间,人类的足迹已踏上月球,相信在不远的将来,火星之旅及其他星球探测也会逐渐变成现实。

人类经过长时间、大量的科学实验与观察证实,随着漫长的空间、时间和物质的不断演化,地球上的生物体在适应这种演化过程中,物竞天择,形成了以地球自转、公转和其他自然环境变化周期为基础的生物节律。这些节律包括近日节律、超日节律和亚日节律。

生物节律是生物体生命活动不可分割的重要组成部分,起着生物能量和物质的吸收与释放的调节作用。这些节律一旦遭到破坏,会对生物体带来不利的影响,而且有些节律一旦受到破坏,生命就要停止。

生物节律是内在的,源自生物体内的生物钟或起搏器(pacemaker)。以近日节律为例,在恒定条件下(通常是无光和恒温),节律以近日周期“自激振荡(free-running)”。同时,内在的节律又与自然环境相适应,自激振荡的节律能被环境时间信息重置或导引。

生物体(包括人类)到了外层空间或其他星球,空间环境(包括引力环境)及时间信息发生巨大变化,以地球自转和公转为周期形成的清晨和夜晚的更迭及春、夏、秋、冬的变迁荡然无存。这些变化对生物体有哪些影响?

1931年,美国著名的飞行家威利·波斯特独自驾驶单引擎飞机向西飞行历时8天,创下了环游世界的壮举,他也因此而成为领受并记录飞行“时差”感的第一人。今天,这种令人烦恼的“时差征”已广为人知。作为飞行员,他注意到了在不同的地理经度上环境时间信息的改变对他带来的影响。据说,他发现了人类身体每天所能够适应的时区变化范围不超过2小时。

1961年4月12日,原苏联航天员加加林首次代表人类造访太空。人类在随后的航天活动中就空间生物节律问题做过一系列实验与观察。美国于20世纪60年代利用“双子星座”号飞行任务,对航天员的心率、睡眠等节律进行过研究,发现在短期航天飞行中,尽管航天器舱外的环境极端恶劣,但在舱内为航天员建造一种自激振荡的节律环境,加之某些授时因子的导引,舱内航天员的生物节律可以保持与地球环境昼夜节律基本一致。当然这是一件很不容易的事,目前的载人航天任务中一些航天员在飞行中还是很难入睡或睡眠时间严重不足,以致对飞行任务的执行产生影响。

随着人类载人航天的发展,航天员在外太空停留的时间不断延长,特别是空间站、月球和将来的火星飞行,甚至在其他星球落户,完全靠在航天器舱内营造一种自激振荡节律环境加授时因子导引的模式已不能满足发展的需要,而且就是这种模式也还有许多问题需要进一步研究,如载人航天长期飞行中的超日节律和亚日节律问题等。对这些问题进行全面、系统、深入的研究便导致了一门新型交叉学科——空间时间生物学的诞生,本书就是为实现这一目标而编著的一门新兴学科的开篇之作。

《空间时间生物学》共分八章,包括空间时间生物学概论;空间时间生物学环境基础;空间时间生物学生理基础;空间生物节律分子生物学机制;空间环境生物节律变化;空间生物节律导引;空间时间生物学研究方法;空间时间生物学展望。

虽然国外开展航天生物节律的研究已有多年,但尚未从空间时间生物学这一高度来系统研究这一问题;我国开展空间时间生物学研究也刚刚起步,加之编者水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,恳请读者予以指正。

中国航天员科研训练中心

陈善广

2008年8月20日于北京航天城

目 录

第一章 空间时间生物学概论	(1)
第一节 基本概念与学科组成	(1)
第二节 空间时间生物学的形成与发展	(2)
第三节 空间和时间	(3)
第四节 空间时间生物学节律类型	(18)
第五节 空间时间生物学的节律特征和基本模型	(21)
第六节 空间飞行的生物节律	(24)
第七节 空间时间生物学主要相关学科	(28)
第二章 空间时间生物学环境基础	(33)
第一节 空间环境概况	(33)
第二节 空间环境节律	(54)
第三章 空间时间生物学生理基础	(93)
第一节 生物节律的结构基础	(93)
第二节 生物节律的生理机制	(146)
第三节 稳态与近日节律性	(205)
第四章 空间生物节律分子生物学机制	(215)
第一节 细胞水平上的生物节律	(215)
第二节 分子水平上的生物节律	(221)
第三节 生物节律的基因调控	(227)
第四节 空间环境中生物节律基因的变化	(249)
第五章 空间环境生物节律变化	(259)
第一节 空间环境中心肺功能节律变化	(259)
第二节 空间环境中体温节律的变化	(274)
第三节 空间环境中睡眠节律的变化	(288)
第四节 空间环境对内分泌节律的影响	(303)
第五节 空间环境对行为的影响	(317)
第六节 其他飞行因素对生物节律的影响	(323)
第六章 空间生物节律导引	(333)
第一节 空间飞行中生物节律的光性导引	(333)
第二节 空间飞行中生物节律的非光性导引	(342)
第七章 空间时间生物学研究方法	(355)
第一节 空间时间生物学的数学模型	(355)

第二节 生物模型.....	(361)
第三节 空间时间生物学研究及数据采集方法.....	(365)
第四节 节律信号分析与识别.....	(365)
第八章 空间时间生物学展望.....	(373)
第一节 深空探测.....	(373)
第二节 空间时间生物学与深空探测.....	(378)
第三节 空间时间生物学对生命科学的贡献.....	(379)
第四节 空间时间生物学在载人航天发展中的作用.....	(379)
中英文对照.....	(391)

第一章 空间时间生物学概论

空间时间生物学是人类载人航天发展到一定阶段的必然产物。国外开展空间生物节律的研究已有多十年,但尚未从空间时间生物学的高度来认识这个学科并形成该领域系统的理论知识、科学的研究方法、适宜的学科框架及学科的教材或专著。国内有关空间时间生物学方面的研究尚在起步阶段。21 世纪将是人类载人航天大发展的重要时期,随着中、长期载人航天飞行越来越频繁,人类将面对长时间脱离地球环境时间暗示(environment time cue)条件,在地球环境形成的生物节律将受到严重影响。基于这种情况,我们认为有必要从空间时间生物学这个高度深入研究生物体(包括人类)在空间环境时间暗示条件下的生物节律,揭示空间时间生物学的基本理论与内涵、节律机制及其基本特征和节律的导引(entrainment)问题,为人类载人航天的发展发挥应有的作用。

第一节 基本概念与学科组成

空间时间生物学(space chronobiology)是揭示生物体在空间时间条件下生物节律、时间结构、节律导引及工程的一门新兴学科。现代航天技术把人类的活动范围从地球扩展到了外层空间。在广阔的宇宙中,千亿颗恒星家族无不按照各自固有的节律周期性地运动着,就像地球围绕太阳转,月亮围绕地球转……受地球及其他天体周期性运行节律的影响,地球上的生物体在漫长的生物进化(evolution)过程中,从单个细胞到高等动植物及人类自身,均存在着按照一定规律运行的、周期性的生命活动现象,这种生命活动现象经过大量的实验研究证明是明显的节律性活动,称为生物节律(biological rhythm)。生物节律是一切生物存在和发展的基础,如果没有严格的生物节律,生物的生命就要受到威胁,有些节律一旦被破坏,生命就不复存在。

生物节律是以空间和时间形式展现的。大量实验证明,生物节律是生物体在地球环境经过漫长的空间、时间变化和进化而形成的内源性节律。这些节律在没有受到外界授时因子(zeitgeber)影响的情况下可以保持其特定的节律周期,但一旦有授时因子的导引,其节律周期和相位将会随着授时因子发生变化。

外层空间对于生物体来说是一种十分严酷的极端生存环境,如大气非常稀薄(500 km 高空的大气密度为 $10\sim 13\text{ mg/m}^3$)、高温(200~500 km 高空温度可达 1000°C 以上)、空间辐射和微重力;无论是近地球轨道、绕月及其他星球的飞行,以地球环境形成的昼夜物理节律,特别是光/暗周期条件荡然无存。除此之外,还存在狭小环境、活动受限和远离社会等因素。生物体处于如此环境,虽有航天器及其环控生保系统提供了基本的生存条件,但其生物节律肯定会受到不同程度的影响。人在外层空间长期生活在航天器内会引发一系列问题,生物节律就是其中重要的一个方面。有研究表明,生物节律受影响的程度会随航天飞行时

间的延长而加重。

本书就是以这种特殊的空间、时间条件为基础,论述空间时间生物学及基本学科,包括下列几个方面:

(1) 空间时间生物学环境基础(environmental foundation of space chronobiology):以空间时间生物学的观点,揭示外层空间(太阳系)物理环境(含模拟空间环境)和其他天体环境对航天器座舱环境时间暗示条件所产生的变量及其规律。

(2) 空间时间生物学生理基础(physiological foundation of space chronobiology):针对外层空间特殊的物理环境、天体运行环境及航天器舱内环境(含上述领域的模拟环境)等时间暗示条件,观测生物体生物节律变量及其生理学机制。

(3) 空间生物节律分子生物学机制(mechanism of molecular biology of space biological rhythm):在分子水平观察航天飞行(含模拟飞行)生物节律的作用机制和基因表达。

(4) 空间环境生物节律变化(changes of biological rhythm of space environment):研究、观察航天环境及航天模拟环境条件下,生物体与时间暗示相互作用时的节律周期特征、相位移动、波形变化和内部相位的关系。

(5) 空间环境生物节律导引(entrainment of biological rhythm of space environment):研究航天环境(含模拟飞行环境)生物节律的运转、授时因子及其他辅助导引措施的效果。

(6) 空间时间生物工程学(space chronobiological engineering):研究空间时间生物学环境控制与模拟技术,包括环境因子(含授时因子)的设计与实现、空间时间生物学专用研究设备的研制等。

(7) 空间时间生物学研究方法(research methods of space chronobiology):研究、探索航天环境(或航天模拟环境)生物节律数学模型、生物模型、数据采集与分析方法等。

第二节 空间时间生物学的形成与发展

空间时间生物学是时间生物学在空间和时间坐标系上的拓展和延伸。

在中国时间生物学研究可谓源远流长。早在上古时代的“三易”[《连山易》、《归藏易》和《周易》(距今 5000~7000 年前)]中,《周易》就以“乾坤”为矛盾的双方,构筑了一个形而上学的宇宙模式。从那时起,人们就很注重天(自然)和人之间的关联,尤其注重在实际生活中自觉把握和运用天体运行规律,并将其运用到了农业等生产活动中。后经过《礼记·月令》和《吕氏春秋·十二纪》,这种思想就形成了我国古代的农学“月令”体,记载和阐述了生物活动与四季变化的关系。

在西方,大自然周而复始的运转,特别是植物春茂秋衰的现象,也很早就引起西方人的注意。在古希腊,最负盛名的哲学家 Aristotie(公元前 384~公元前 322 年)曾在其著作中描述了动物活动的周期性。

以 Halberg 为代表的现代时间生物学创始人,把传统的时间生物学研究推向了现代时间生物学研究,创建了一整套时间生物学的研究方法和数据分析方法,把过去定性观察描述生物节律提升到定量研究分析,将宏观分析引入到微观分析。

1961 年 4 月 12 日,原苏联航天员加加林乘坐“东方”1 号飞船上天,成为世界航天第一

人,人类将自己的生存环境拓展到了外层空间。23 天后的 5 月 5 日,美国航天员艾伦·B. 谢泼德驾驶美国“水星”3 号飞船进行首次载人亚轨道飞行,使美国成为继苏联之后世界上第二个具有载人航天能力的国家。2003 年 10 月 15 日,中国航天英雄杨利伟实现了中国人的千年飞天梦想,使中国成为第三个具有独立完成载人航天飞行能力的国家。人类载人航天经历了 40 余年发展历程,到目前为止,先后完成了舱外活动、交会对接、登月飞行、建立空间站、发射航天飞机和在空间站连续飞行 439 天的纪录。

回顾人类 40 余年载人航天的历程,人类将自己的活动空间拓展到外太空后,接踵而至的问题就是在地球上形成的生物节律在外层空间如此恶劣的环境下会产生哪些变化? 这些变化的生理机制又如何? 可否对这些变化进行干预等。由于生物节律的正常运转在载人航天中占有重要位置,所以从开始实施载人航天的那一刻起,人们就一直对上述问题十分重视。这些都为空间时间生物学的诞生打下了良好的基础。

早在航空时代到来的时候,人类就已经观察到了不同地理经度上环境时间信息的改变对他们带来的影响。美国著名的飞行家威利·波斯特独自驾驶单引擎飞机向西飞行历时 8 天,创下了环游世界的壮举,他也因此而成为探寻和记录飞行“时差”感的第一人。

20 世纪 60 年代初,航天生物节律问题只限于在地面上开展一些实验性研究;而且为了解决航天中航天乘员工作效率问题,有关生物节律的研究大都集中在近日节律。例如,1961 年美国俄亥俄州的航空系统部就曾在禁闭条件下就人的工作-休息比例对操作能力影响的问题进行过研究。随后,该部门还就飞行乘员作息时间与工效问题开展过一系列研究。

1967 年,Adey 在“水星”号执行任务期间,首次对人在外太空的近日节律运转情况进行了评估。这次评估认为近日节律对航天飞行没有干扰,因此,在随后的飞行中就没有针对生物节律再安排过专门的飞行实验进行观察。

实际上,近日节律问题的存在是在对收集到的其他飞行生理数据分析时被意外发现的。然而,真正有文献报道空间飞行近日节律问题还是在 1969 年进行的“生物卫星”3 号动物飞行实验后。在此之后的 30 余年的航天活动中,美国和原苏联利用猴子和大鼠在极端环境控制条件下,针对特定的昼夜节律做过许多实验。对典型的昼夜节律自激振荡周期、相位、波形变化以及内部相位的关系进行了观察。

2005 年 10 月 15 日,中国人突破载人航天技术对世界产生了巨大震撼。载人航天第二步发展计划及“嫦娥”工程的实施为人类和平利用外层空间打下了坚实的基础。为了解决人类对外层空间、月球乃至火星探测时长期飞行带来的生物节律问题,陈善广研究员于 2006 年首次提出建立空间时间生物学学科,系统、全面地就航天生物节律问题开展全方位研究。

第三节 空间和时间

《淮南子·齐俗训》曰:“往古来今谓之宙,四方上下谓之宇,道在其中……”著名科学思想家史蒂芬·霍金在《时间简史》中对空间和时间有过精辟的论述,空间和时间被认为是事件在其中发生的固定舞台,而它们不受在其中发生的事件的影响。即使在狭义相对论中这也是正确的。物体运动,力相互吸引并排斥,但时间和空间则完全不受影响地延

伸着。然而在广义相对论中,情况则相对不同。这时,空间和时间变成为动力量,当一个物体运动时,或一个力起作用时,它影响了空间和时间的曲率;反过来,空间-时间结构影响了物体运动和力作用的方式。空间和时间不仅去影响它们,而且被发生在宇宙中的每一件事所影响。古今中外科学家对空间和时间的论述为我们研究空间时间生物学提供了朴素的理论基础。

宇宙由空间、时间和物质组成;空间、时间和物质是不可分割的统一体,没有脱离物质运动的空间和时间,也没有不在空间和时间中运动的物质,物质在空间运动时力是相互吸引并排斥的。在太阳系的地球上,人类感受到空间物质运动最直接的现象为昼、夜及春、夏、秋、冬的时间变动;时间的流逝,体现出空间物质的位移,而万物就在其中发生和发展,并受其影响,形成生物的时空结构,影响生命的基本活动(图 1-1)。

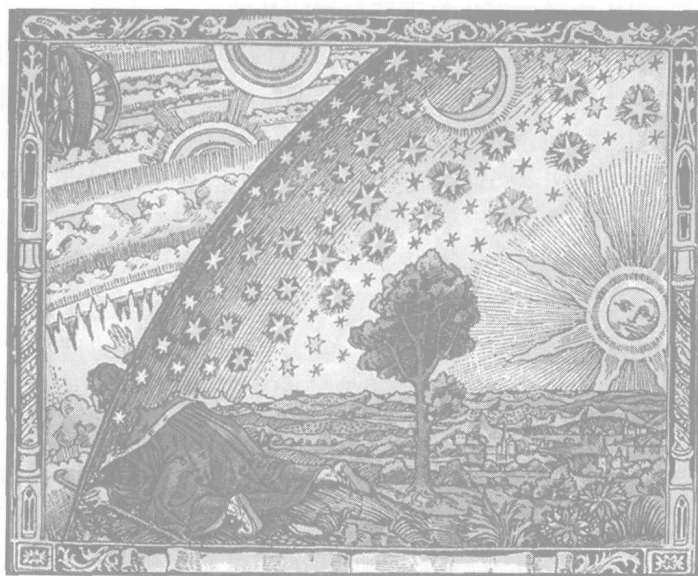


图 1-1 人和宇宙

载人航天活动从本质上讲不可能不遵循空间、时间和物质运动的基本规律。从火箭点火起飞的那一刻起,航天器舱内的动植物或航天乘员在感受空间、时间和物质运动现象等方面都会发生变化。这些变化足以引起生物体时空结构中某些节律的改变,如果出现某些特殊的事件,甚至会破坏这些节律。

一、空间的概念与本质

空间(space)在航天领域也称太空或外层空间。在现代物理学中是指由长、宽、高构筑而成的三维立体,它与时间共同组成宇宙。人们认为,宇宙是大约 150 亿年前在原始火球的大爆炸中诞生的。自那时起,宇宙一直在膨胀,因此,宇宙可能是无边无际的,但还是有极限的。在广阔的宇宙中,有众多的星系及流动的气体 and 尘埃云(即物质),太阳系就是众多星系中的一个家族,而地球则是太阳系中的一位成员(图 1-2)。

在太阳系以内的空间可分为行星空间和行星际空间。行星空间是指行星引力的作用范

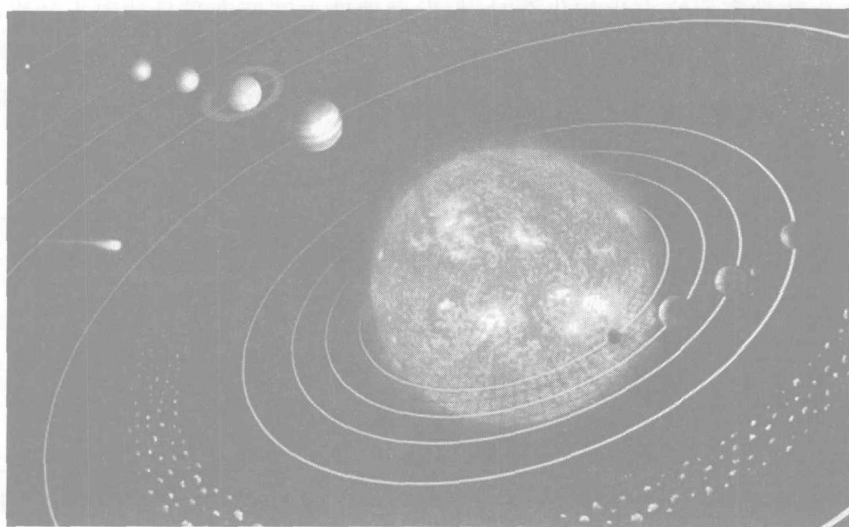


图 1-2 太阳星系示意图

围,或行星磁层、大气层所及范围。例如地球空间,若按地球引力作用范围来确定,其半径为从地心向外约 93 万 km;若按地球磁层所及范围来确定,其半径为从地心向外约 6.5 万 km。太阳系行星之间的空间称为星际空间,其半径外点距太阳约 60 亿 km。太阳系以外的空间可分为恒星际空间、恒星系空间和星系际空间等。另外,一些国际组织规定,距地球约等于或大于地-月距离(约 38.4 万 km)的空间称为深空。有时把地球静止卫星轨道高度(约 3.58 万 km)及其以下的空间称为近地空间。外层空间的下界至今尚未定论,一般认为下界距地面 100km 左右。负责美国太空飞行任务的部门将太空的边界定在距地面 121.92km 以上;而该部门开始时规定,凡是驾驶或乘坐飞机或其他交通工具到达距地球 80.47km 以上高度的公民,可以被授予航天员的殊荣。

(一) 外层空间的变化

大科学家爱因斯坦在他的广义相对论中对宇宙所做的预言指出:“宇宙不可能是静态的。众多的星系和星系之间的引力作用将它们互相往一起拉,除非它们彼此分道扬镳、四散分离。在这种情况下,宇宙都不可能静止不动。”现代科学家有关宇宙“大爆炸”和“膨胀”理论是空间不断变化的最好例证与说明。如果宇宙是在膨胀,其膨胀的结果肯定会使宇宙变大。美国天文学家埃德温·哈勃(Edwin Hubble)证明了这一点,他在 1929 年里程碑式的观测中发现,无论向哪里看,遥远的恒星都在快速地离我们而去。在随后的观测与研究中,他进一步证实,宇宙像一团突然释放到真空中的热气那样膨胀着。每一星系,相当于这一气体的一个分子。当这一气体云在膨胀时,其中的所有分子都在同一时间周期内,把它们之间的距离拉长一倍。经历着一个比第一个时间周期长一倍的第二个时间周期后,距离加倍的情况会再次发生。这就意味着宇宙是向四面八方无限地扩展。空间物质的存在,造成一种弯曲的引力惯性场,它使各天体形成球状体,并使卫星在圆形轨道上运行。

地球自转速度的变慢是宇宙不断变化的另一个例证。据天文学家在分析古代日食和月

食记录及古生物学家研究古生物化石时,都发现地球自转速度受月球引力的影响在减慢。据他们计算,地球在尚未形成地壳时的一天只有 4 h;40 亿年前的远古代,地球自转一周需要 13 h;距今 2 亿年后将是 25 h;10 亿年后将是 80 h。Hartmann 和 Miller 等人对地球变慢做了计算,结果见表 1-1。

表 1-1 月球对地球的引力作用使地球自转变慢的计算值

时间范围	一个地球转动周期(h)	时间范围	一个地球转动周期(h)
45 亿年前	6.00	2.45 亿年前	22.75
44 亿年前	10.00	1 亿年前	23.50
40 亿年前	13.50	当今	24.00
9 亿年前	18.17	2.25 亿年后	25.00
4 亿年前	<22.00		

注:引自 Hartmann WK, Miller R. 1991. The History of Earth. An Illustrated Chronicle of an Evolving Planet. New York: Workman; Barnett JE. 1998. Time's Pendulum; The Quest to Capture Time from Sundials to Atomic Clock. New York: Plenum

(二) 天体运动

地球上的人类,很早就注意到了日月星辰的运动。人们根据农牧业生产和航海的需要而开始对天体的运动进行观测和研究。我国早在 3000 多年前的殷商时代,根据对天体运动的观测就制定了相当严密的历法,让农民依据 1 年 24 个节气进行生产。其他文明古国,如埃及、印度、巴比伦、希腊等,也在古代就开始了天体运动的观测研究。

对天体运动的认识,历史上曾经有过两种不同的观点,即地心说和日心说。地心说认为地球是宇宙的中心,是静止不动的,太阳、月球和其他行星都围绕地球运动。地心说是以亚里士多德为代表的哲学家们提出的。他们还认为,天体都沿着最完美的轨道——圆周运动。公元 2 世纪,天文学家托勒密写了《天文集》一书,使地心说进一步得到发展和完善。由于地心说符合人们每天看到的日月星辰从东方升起、从西方下落的现象,又符合天主教关于地球是宇宙中心的教义,因而得到教会的支持,长期被当做信条,禁锢了人们的思想达千余年之久。

但是,随着人们对天象的深入观测,对天文资料的丰富积累,发现实际观测到的行星位置与按地心说推算出的偏差越来越大,这表明地心说没有揭示行星运动的本质规律。16 世纪,波兰天文学家哥白尼(1473~1543)根据天文观测的大量资料,经过 40 多年的细致观测及潜心研究,提出了日心说。

日心说的主要内容是:太阳是宇宙的中心,地球和其他行星都围绕太阳公转,并且自转着。哥白尼的日心说基本上正确地反映了行星的运动情况,能够简明地说明许多天文学问题,很快就传播开来。但是,日心说不符合宗教的教义,被教会视为异端邪说。意大利人布鲁诺(1548~1600)因坚持日心说被教会用火烧死,伽利略也因宣传日心说受到教会的审讯和囚禁。直到 1979 年 11 月 10 日,在大量的事实面前,教会才迫不得已宣布对主张日心说的人的迫害是错误的,承认地心说是不正确的。

对天体运行规律的观测做出贡献的还有丹麦天文学家第谷(1546~1601)。他连续 20

年对行星的位置进行细致观测和认真记载,积累了大量精确的数据。这些数据由他的学生、德国人开普勒(1571~1630)经过4年多刻苦、周密地计算,先后否定了19种设想,发现了行星沿椭圆轨道运行的规律,即开普勒三定律,把天文学又向前推进了一大步。

在这些基础上,英国科学家牛顿(1643~1727)于1687年发表了著名的《自然哲学的数学原理》一书,第一次建立了重力和万有引力的理论,发现了力和运动的定律。牛顿的万有引力定律的陈述如下:宇宙中每个质点都以一种力吸引其他各个质点,这种力与各质点的质量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比。如果这些质点具有质量 m_1 、 m_2 ,并且在它们之间具有距离 r (它们质心的连线长度),它们之间以万有引力相互作用的量值如下:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

牛顿的万有引力的概念和量化一直持续到了20世纪初,直到相对论证明其在超距作用上的观点站不住脚之后。在广义相对论中,诞生于德国的物理学家阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)对万有引力进行了全新的解释。爱因斯坦认为:存在的物质对四元时空的扭曲,产生了牛顿以某些吸引力为原因解释的所谓天体按照测量出的弯曲轨道运行的宇宙。

牛顿万有引力定律的发现和应用,对于计算和了解我们的太阳系内各个行星的详细信息、太阳的质量、恒星间的距离,甚至被用于推测暗物质理论发挥了重要作用。尽管人类还没有去过太阳等其他星球,但我们都可以知道它们的质量,这些都是通过万有引力定律研究得出的。在空间中,任何物体都按照一定的轨道围绕某些大质量物体运转,它们之间的万有引力保持着它们的轨道。行星围绕恒星运转,恒星围绕星系中心运转,星系围绕星团中心运转,星团围绕超星系团运转。

近代天体运动研究的一些学者认为,宇宙中没有静止的物体,一切物质不会无缘无故地运动,所有物质运动都是以引力、斥力、转力这三种力场相互作用的形式运动,即三对力既平衡又守恒运动,简称三对力平衡运动:①万有斥力与万有引力是对立关系,即大小相等方向相反,或者说,两力的矢量和等于零;②离心力与向心力是对立关系,即大小相等方向相反,或者说,两力的矢量和等于零;③主动切线力与被动切线力是对立关系,即大小相等方向相反,或者说,两力的矢量和等于零。任何天体运动的力场源都在本体系中心,中心是有几种力场源共同作用直接或间接地带动本体系天体运动,几种力场共同作用带动本体系天体运动。

(三) 天体运动规律

由上述可知,空间中的任何物体都是按照引力、斥力、转力这三种力场相互作用形成的特定的轨道围绕某些大质量物体运转,保持着它们的轨道,因而可以说天体运动最重要的规律之一就是“各行其道”。以太阳系来说,八大行星围绕太阳旋转的轨道是椭圆形轨道(水星的运行轨道是圆形轨道,但圆形轨道只是椭圆形轨道长短轴相等的特例)并或多或少都在同一个平面。地球绕太阳公转的轨道平面称为“黄道面”(ecliptic plane),它与地球相交的大圆为“黄道”。黄道面与赤道面交角为 23.5° 。黄道及其附近的南北宽 8° 以内的区域称为黄道带。太阳及大多数行星在天体上的位置常在黄道带内。

在天体运行中,其力场源中心的天体称为引星体(恒星),围绕引星体运动的天体称为卫

星。地球是太阳的卫星,月球又是地球的卫星,它离地球约 38.4 万 km,围绕地球转一周约 27.25 天,自转周期为 29.12 天。

卫星可分为自然卫星和人造卫星,人造卫星或航天器是指由人类送入轨道的机器。月球虽然是在环绕地球的轨道上运动,但其自身的引力决定了将航天器送上绕月轨道是可行的。目前人类载人航天轨道主要围绕地球飞行,美国于 20 世纪 60~70 年代完成了登月飞行。人造卫星或航天器绕地球与月球飞行要克服其引力,而引力又与卫星或航天器距离地球或月球表面的距离有关。地球与月球的轨道如表 1-2 所示。

表 1-2 人造卫星在地球轨道与月球轨道的运行速度

轨道高度(km)	地球轨道	月球轨道
0	7905 m/s	1680 m/s
	28 459 km/h	6047 km/h
200	7784 m/s	1591 m/s
	28 023 km/h	5727 km/s
1000	7350 m/s	1338 m/s
	26 460 km/h	4818 km/h

八大行星围绕太阳旋转的轨道是椭圆形轨道,那么它们运动的周期又怎样呢? 我们最熟悉的天体运动周期莫过于太阳系的地球了。地球的自转周期为 23.56 h,公转周期为 365 天。太阳系星球运转周期见表 1-3。

表 1-3 太阳系行星运转周期表

行星名称	与太阳的距离(10^6 km)	直径(10^3 km)	日周期(h)	年周期(d)
水星	58	4.9	1410	88
金星	108	12.1	5830	225
地球	150	12.8	24	365
火星	228	6.8	24	687
木星	778	142.8	10	4380
土星	1427	120.7	11	10 750
天王星	2870	51.8	17	30 660
海王星	4497	49.5	16	59 400

航天器围绕近地球轨道飞行时其飞行周期一般约 90 min。轨道高度不同,其轨道周期也有所不同。表 1-4 是地球轨道高度与飞行周期统计表。

表 1-4 地球轨道高度与飞行周期对应表

轨道高度(km)	周期	轨道高度(km)	周期
海平面	1 h 24 min 29 s	10 000	5 h 47 min 40 s
300	1 h 30 min 31 s	100 000	3 d 23 h 54 min
1000	1 h 45 min 07 s	384 400	28 d 3 h 18 min

注:海平面高度是理论值,现实中不存在;384 400 km 是月球的轨道高度。

二、时间的概念与本质

史蒂芬·霍金在《宇宙简史》中对时间的开端是这样认为的:对我们而言,在大爆炸之前的事件没有后果,所以不能成为宇宙科学模型的一部分。因此,我们应该从模型中把它们割除,并且声称大爆炸是时间的起始。“大爆炸”有关“时间开端”的学说至少可以说明时间的存在远比人类乃至生命的存在要久远得多。

那么,时间是什么?看上去这是个最平常、最简单的问题,但也确是个最深奥、最复杂,的问题。所谓最平常、最简单,是说它自古以来就作为最基本的概念已引入到人类的日常生活中,即使在科学中时间的单位也是最基本的单位之一。所谓最深奥、最复杂,是说人类有关时间的争论已经进行几千年了,但至今有些问题尚未有个明确的定论。例如,时间是虚的吗?时间有箭头吗?时间有周期吗?时间有终点吗?……

时间的本质在于它的物理性,它的存在并不依赖于人的意志,可以认为它是宇宙万物发生、存在乃至运动的一种基本形式。我们建立时间观念,是为了更方便地确定这种运动的变化、确定事物的主体。

对于地球人来说,精密的太阳系时间是科学研究、科学实验和工程技术诸方面的基本物理参量。它为一切动力学系统和时序过程的测量和定量研究提供必不可少的时基坐标。从牛顿力学到现代的量子论和相对论,一直作为我们描述物质运动变化中必不可少的最基本概念之一。虽然在相对论中时间的概念和牛顿力学中的时间概念存在不同,但在时间概念的判断方式上——时间是最基本的概念。

时间的第一次解读,有阳历、阴历和阴阳历的不同形式,均由观察天象变换而来。它是基于人们日常生活中时间的观念,依据地球的公转、自转及月球的公转和人们的经验感觉而定义的。按照中国的传统历法,1年有12个月,1个月有30天,1天有12个时辰。这种历法属地球人在太阳系的最常用的时间读数之一,它与社会的发展和人类生活息息相关,体现了浓厚的节律现象,日出而作,日落而息,春播、夏耘、秋获、冬藏……周而复始。

三、时间的属性与计量

人类关于太阳系时间的形成与发展是人类在长期实践中为了描述物质世界的运动和体系而诞生的,它是人类社会文明与进步的象征。这种时间历法与社会的发展和人类生活息息相关。不可想象没有时间的社会是个什么样子……

如上节所述,太阳系时间的历法是采用地球围绕太阳的公转或者地球自身的旋转或者月球围绕地球的公转来做时间定义的。地球自转1周作为天的单位;月球围绕地球公转1周作为月的单位;地球围绕太阳公转1周作为年的单位。1956年,国际计量委员会将秒规定为1900年1月0日12时正回归年长度的 $1/31\,556\,925.974\,7$ 。这种以地球公转为基础的秒的时间标准称为历书秒(随着科学技术发展的需要,时间单位秒的标准如今已发展到原子级水平)。那么,在这种时间的定义中,我们参照的主体是物体运动变化的某种周期,可以说我们定义的标准是非惯性参照系,是以非惯性参照系的某种运动的周期或者某种进程作为时间判定的依据,并以此对物质运动变化过程进行进程的判定。我们实际所做的只是拿物质运动变化过程和这一标准的事件进程做比较,其中多少时间或者多长时间是指我们所

采用的标准事件的进程。如钟表的时针、分针、秒针运动的过程,我们赋予它时间单位和所持续的过程,这就是时间的属性。



图 1-3 古代农历的一日时象图

太阳系时间的历法历史悠久,在人类发展史上起到过重要的作用。早在远古时期,人类就以“结绳记日”和“刻木记日”来计算时间。在中国,从炎黄时期(公元前 2550 年左右)其身边的大臣就开始制定历法,有羲和占日、常仪占月、史区占星气节和容成造历法之说。禹夏时期(公元前 2280 年左右)尧曾派羲仲、羲叔、和仲、和叔 4 人分驻东西南北,观测天象,判定季节,修制了 1 年 366 天的历法(图 1-3),规定了一个置闰的方法。到殷商时期(公元前 1600 年左右),商代的天文学家们已经开始系统地观测、记录天文和气象,他们在世界上最早记录了一颗超新星。

在商代,时间历法已发展成为一种初步完备的阴阳合历(殷历)。有关时间的文字记载最早也出现于殷商时代的甲骨文干支表。干,就是天干,天干为十,即甲、乙、丙、丁、戊、己、庚、辛、壬、癸。支,就是地支,地支为十二,即子、丑、寅、卯、辰、巳、午、未、申、酉、戌、亥。另外,天干和地支相与配对,奇对奇,偶对偶,依次组合为六十甲子,成为六十干支纪日法。这种纪日方法后来发展为纪年的方法——农历纪年法;纪年、日,数 60 为一个周期,纪月、时,数 12 则周而复始。因为天干数是十,地支数是十二,依次相合后,凡六十又回到甲子,这一组合称为“六十甲子”(表 1-5)。到了东汉时期,诸多学家将干支表与阴阳五行所蕴有的时域相结合,使时间的属性更具天文学背景和意义。

表 1-5 六十甲子表

甲子	乙丑	丙寅	丁卯	戊辰	己巳	庚午	辛未	壬申	癸酉
甲戌	乙亥	丙子	丁丑	戊寅	己卯	庚辰	辛巳	壬午	癸未
甲申	乙酉	丙戌	丁亥	戊子	己丑	庚寅	辛卯	壬辰	癸巳
甲午	乙未	丙申	丁酉	戊戌	己亥	庚子	辛丑	壬寅	癸卯
甲辰	乙巳	丙午	丁未	戊申	己酉	庚戌	辛亥	壬子	癸丑
甲寅	乙卯	丙辰	丁巳	戊午	己未	庚申	辛酉	壬戌	癸亥

中国古代记时主要是根据太阳的升落及天色的明晦。据记载,人类最早认识的时间单位是“日”,而不是“小时、月和年”。古时候,由于人类生活还十分落后,大自然对人类生存的影响十分严重,那时还没有任何东西能够像黎明那样降于大地给以光明和温暖,以日落带来黑暗与寒冷。太阳东升西落,周而复始,循环出现,这样天然的时间变化周期,使人们产生了日的概念。有了日的概念便产生了计数日期的需要。从汉武帝太初元年的“太初历”开始,把一天分为十二时:夜半、鸡鸣、平旦、日出、食时、隅中、日中、日辰、晡时、日入、黄昏、人定。后改用 12 地支表表示,每 2 h 为一段时间。唐代以后的十二时辰制已具有当今 24 h 一天的含义。中国古代关于太阳系时间的历法为人类认识宇宙、推动科学技术的发展起到了巨大的作用,这种历法直到现在还在发挥着不可替代的作用。

随着科学技术的不断发展和人们对时间认识的不断深化,太阳系时间的计算方法和计时仪器也都有了较大的发展,从圭表测日、日晷测日、铜壶滴漏(水钟)、机械钟、电子钟到日