

中国现代科学全书·空间科学卷

主编 王大珩 张厚英

空间化学

Space Chemistry

李春来 欧阳自远 等著

哈尔滨工业大学出版社

中国现代科学全书·空间科学卷

主编 王大珩 张厚英

空间化学

李春来 欧阳自远 等著

哈尔滨工业大学出版社

2005·哈尔滨

内 容 简 介

本书比较全面地论述了当代空间化学和行星地质学的基本概念、理论和研究进展;尤其侧重于元素的起源与丰度、太阳系化学演化、行星化学与地球物理特征、月球化学、陨石学理论与研究进展、宇宙尘以及撞击事件等。该书还从空间化学和行星地质的角度,系统论述和总结了当今行星探测取得的重大进展和丰硕成果,将对地球科学、行星科学和天文学相关领域的研究和教学有所裨益。

本书可作为地质学、地球化学、天体化学、空间科学等专业的研究生的教学参考用书,亦可供从事天体化学、陨石学、月球与行星探测研究和应用领域的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间化学/李春来,欧阳自远等著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.2

(中国现代科学全书·空间科学卷)

ISBN 7-5603-1840-1

I . 空… II . ①李…②欧… III . 天体化学
IV . P148

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 137258 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451 - 86414749
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787×960 1/16 印张 24 字数 400 千字
版 次 2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5603-1840-1/V·12
印 数 1~3 000
定 价 32.00 元

《中国现代科学全书》总编辑委员会

名誉主编	胡 绳	钱伟长	吴阶平	周光召
	许嘉璐	罗豪才	季羨林	王大珩
	郑必坚			
主 编	姜士林	郭德宏	刘 政	程湘清
	卞晋平	王洛林	许智宏	白春礼
	卢良恕	徐 诚	王洪峻	明立志

《中国现代科学全书·空间科学卷》编辑委员会

主 编	王大珩	张厚英	
编辑委员	(以姓氏笔画为序)		
	刘振兴	江丕栋	欧阳自远
	黄惠康	潘厚任	

《中国现代科学全书·空间科学卷》

总 序

张 琳 张雪英

外层空间浩瀚无垠,是人类借助于空间科学技术扩大其活动范围的最新领域。1957年人造卫星上天,标志着人类进入了空间时代。空间的探测为人类认识自然界增添了新的知识,为了解地外空间环境,为研究宇宙的起源和演化、太阳系的起源和演化以及生命的起源和演化,积累了丰富的、极有价值的科学资料。空间科学技术是一个新兴的领域,也是当代高科技发展的前沿领域之一,发展神速,涉及的内容和范围十分广泛,并已从试验阶段发展到应用阶段,从单纯的政治、军事目的逐渐走向空间资源的开发和利用。

《中国现代科学全书》是由全国人大常委会办公厅研究室、中国人民政治协商会议全国委员会研究室、中共中央党校中共党史教研室共同发起、组织编写的一套规模宏大的学术专著丛书,系统全面地概述现代自然科学和社会科学各学科的建设、发展及其学术研究成果,是21世纪中国科学文化建设的重大工程。《中国现代科学全书·空间科学卷》是其中的一卷,包括五个分册:《太空学概论》、《太空物理学》、《空间化学》、《空间生物学》和《外层空间法》,这是中国科学院数十位工作在空间科学研究第一线的科研工作者历时两年的呕心沥血的结晶,它系统全面地概括了国内外空间科学几个分支学科的基本理论及其发展趋势,展示了最新的研究成果以及当前的发展态势。

《太空学概论》由潘厚任、王景涛教授撰写。该书从太空研究、太空科学探测和实验的角度,以有效载荷为主线,对人类在太空的活动进行了较全面的概括性的介绍和评述。

太空物理学是一门应用性很强的基础学科,与地球物理学、大气物理学和太阳物理学紧密交叉,构成了人类认识自身生存环境的重要前沿学科之一。《太空物理学》一书由刘振兴院士撰写。该书论述的分支学科包括太阳大气物理、日球层物理、磁层物理、电离层物理、高中层大气物理、太空环境和太空探测等。

空间化学与地质学研究已经步入成熟阶段,在地外物质与太阳系早期演化的研究中,我国学者开拓了一系列新领域的研究。《空间化学》是一部论述国内外最新研究进展的学术专著,由李春来教授和欧阳自远院士撰写。该书比较全面地论述了当代空间化学和行星地质学的基本概念、理论和研究进展,并且从空间化学和行星地质的角度,系统地论述和总结了当今行星探测取得的重大进展和丰硕成果。

空间生命科学是伴随空间微重力的环境和载人航天活动而产生和发展起来的。《空间生物学》由江丕栋教授撰写。它是我国第一部系统地、全面地介绍空间生物学的书籍。该书介绍了空间生物学和空间生物技术领域的国内外发展状况,以及近年来利用分子生物学、细胞生物学和分子遗传学等新进展所取得的成果。

《外层空间法》由贺其治和黄惠康教授撰写。空间法是现代国际法的一个发展中的新分支,但目前我国在外层空间法的普及和研究方面,同我国所处航天大国的地位极不相称。该书是我国空间法学界研究空间法的一项最新成果,对促进我们开展这方面研究,继而同国际接轨是十分重要的。

在《中国现代科学全书·空间科学卷》的编写中得到了中国科学院空间科学与应用研究中心、中国空间科学学会、中国空间法学会以及中国科学院相关的研究所的大力支持,在此表示衷心的感谢。

2003年6月

于北京

前 言

空间化学是研究宇宙空间物质的化学组成和化学演化规律的一门科学,它以宇宙空间各层次的天体物质为研究对象,从组成物质的最基本单元——核素和元素出发,研究各类核素与元素的起源及其在不同层次天体中的分布特征与规律和随时间的演化,进而研究宇宙空间各层次天体的形成与演化过程。

空间化学所探讨的对象,从宇宙空间的基本粒子到星系,时间跨度从宇宙起源到现今,涉及到的时间尺度为 $10^{-44} \sim 10^{17}$ s;空间尺度为 $10^{-28} \sim 10^{29}$ cm;质量为 $10^{-23} \sim 10^{45}$ g;温度由近于绝对温度零度到 10^{32} K……总之,空间化学是天文学、空间科学、地球科学、化学与空间探测等诸多学科高度交叉、渗透和融合的一门边缘学科。

空间化学在科学界一直是非常活跃的科学领域,并不时有重大的研究发现,如对月球的系统研究,使我们真实地感受到地球之外也是一个物质世界;月球陨石,尤其是火星陨石的发现和研究,在人类取得深空探测取样之前,解决了火星地质和成因方面的许多重要问题;长期以来陨石的研究,使太阳系周期的演化过程变得越来越清晰;近年来在火星陨石中发现存在火星生命的可疑迹象,引起了科学界的广泛关注。

空间化学是我们获得太阳系形成和演化信息的主要途径,空间化学的研究成果对人类宇宙观的形成和演变起到了决定性的影响。加深对地球系统的整体认识,以及将行星地球置于宇宙和太阳系中来研究是地球科学发展的趋势,因此,空间化学必然会对地球科学产生深远的影响。通过对宇宙尘和空间碎片的研究,不仅为认识太阳星云的凝聚和太阳系早期演化历史可以提供最有价值的信息,对航天器防护壳的设计、航天材料的选择和撞击损伤的预防也具有重大

的理论意义。对月球化学的深入研究,不仅对地月系统的起源和演化有决定性的影响,而且直接影响到我们对月球上的矿产资源(钛、钾、稀土、磷等)、能源资源(氦-3、生命支持气体、太阳能等)、环境资源(高真空、高辐射、无磁场、无大气、地质构造稳定等)的利用,对科学、经济、军事、人类未来发展都具有重要的意义。

空间化学是从研究太阳光谱的拍摄以及陨石的矿物和化学成分起始的。20世纪60年代以来,微束分析和质谱分析技术使空间化学取得了迅猛的发展,研究领域不断扩大,新的研究成果层出不穷,极大地深化了我们对太阳系物质演化和其他天体的认识。

空间探测是空间化学发展的重要平台。20世纪50年代以来的月球和火星探测活动,对空间化学的发展起到了重要的推进作用,使人类对月球和火星的化学、物理与地质过程的认识达到了相当高的程度。在今后相当一段时间内,重返月球和火星探测仍将是国际空间探测和空间科学的主要内容,空间化学研究既要贯彻在空间探测的整个阶段,更要走在前面,为今后的月球和深空探测作科学、人员和研究方法上的准备。目前,月球和火星探测的目标已经进入到资源调查和勘察阶段,进而建立人类居留的基地,因此,与资源开发利用有关的矿物学和化学成分的研究,例如,钛铁矿、水冰和有用气体资源的分布、赋存形式及利用方式等,已经提到议事日程。2004年我国启动了绕月探测工程,标志着我国深空探测的开始。绕月探测工程的主要目标是月球科学和资源调查,这既为我国空间化学的发展提供了机会,也对我国深空探测的科学目标设计负有责任。

本书概述了空间化学研究的主要领域,第一章由欧阳自远和李春来完成,主要论述空间化学的定义、概念、研究范围、研究内容、发展历程和现状,以及中国空间化学研究状况;第二章由欧阳自远和王世杰完成,系统地叙述了元素的起源和丰度;第三章由欧阳自远和李春来撰写,论述了太阳星云的化学组成和化学演化理论;第四章由李春来和欧阳自远完成,从理论到探测、分析数据,较全面地描述了太阳系各行星和行星系统的化学成分和地质演化,包括行星形成和演化理论,最新探测数据的大气化学成分和结构、表面形貌和表面特征、物质构成、内部结构以及地质演化;第五章由邹永廖、李春来和欧

阳自远完成,系统论述了月球探测、月球化学和月球地质演化,反映了月球探测和月球科学研究的最新成果;第六章由邹永廖、欧阳自远和李春来撰写,介绍了小行星化学、彗星化学和流星体化学的理论和最新研究成果;第七章由李春来、欧阳自远和邹永廖完成,系统论述了陨石学和宇宙尘的理论、研究方法和研究成果;第八章由欧阳自远、王世杰和李春来完成,叙述了宇宙的时间序列,包括宇宙各层次的时间定义和分析研究结果;第九章由李春来和欧阳自远撰写,叙述了对空间化学发展的前景和展望。全书由李春来负责统稿和校定。

本书是在中国空间科学学会的组织下撰写的,在构思和编写过程中,除了得到《中国现代科学全书》总编辑委员及《中国现代科学全书·空间科学卷》编辑委员们的指导和帮助外,还得到了王道德教授、林文祝教授、王先彬教授、倪集众教授和林杨挺教授等的支持和帮助;中国科学院地球化学研究所天体化学研究室和中国科学院国家天文台月球与深空探测科学应用中心的很多同志为本书的出版做出了贡献;本书引用和反映了国内外空间化学、天体物理、天体化学、天文学、陨石学、空间探测等方面无数科学工作者的研究成果和数据资料,对他们的贡献无法一一言表和致谢,作者在此一并表示衷心的感谢。

作 者

2004年8月 于北京

目 录

第一章 空间化学概论	
第一节 空间化学的研究对象与范围	1
第二节 空间化学的发展简史	4
第三节 中国空间化学的发展与特色	7
第二章 元素的丰度与元素的起源	
第一节 元素与核素的丰度	14
第二节 元素的起源	32
第三章 太阳星云的化学组成与化学演化	
第一节 太阳星云的化学元素分布特征	37
第二节 太阳星云的凝聚过程	51
第三节 太阳系各层次天体的凝聚与增生过程	57
第四节 地球的两阶段增生模型	62
第四章 行星化学	
第一节 行星的起源	70
第二节 行星的大气化学	74
第三节 行星的表面形貌	81
第五章 月球化学	
第一节 月球探测活动及探测结果的一般素描	145
第二节 月面的一般特征	152
第三节 月表化学	162
第四节 高地月壳化学	175
第五节 月海化学	190
第六节 月球内部构造与化学组成	206
第七节 月球的化学成分、成因与演化	214

第六章 小行星、彗星与流星体化学	
第一节 小行星的分布、成分、类型及成因	225
第二节 彗星化学	234
第三节 流星体的化学组成	244
第七章 陨石和宇宙尘	
第一节 陨石的降落过程和降落通量	249
第二节 陨石的分类	254
第三节 球粒陨石概论	256
第四节 碳质球粒陨石	260
第五节 普通球粒陨石	266
第六节 顽火辉石球粒陨石和顽火辉石非球粒陨石	275
第七节 分异陨石:铁陨石、石铁陨石及其衍生物	279
第八节 钙长辉长无球粒陨石共生体	297
第九节 宇宙尘	322
第八章 宇宙的时间序列	
第一节 概述	333
第二节 宇宙年龄	334
第三节 元素年龄	336
第四节 太阳系天体形成与演化的年龄	336
第九章 空间化学研究发展展望	
第一节 中国空间化学发展回顾	346
第二节 国外空间化学最新进展	355
第三节 空间化学的发展趋势	362
参考文献	368

第一章

空间化学概论

第一节 空间化学的研究对象与范围

一、空间化学的研究对象

空间化学(space chemistry)是研究宇宙空间物质的化学组成和化学演化规律的一门科学,即研究元素与核素的起源、空间分布及其随时间的演化历程。它与空间物理学、空间天文学、空间生命科学等学科均属空间科学的组成部分,是空间科学的分支学科。

我国部分学者称宇宙空间为太空,空间科学称为太空学,空间化学也可称为太空化学,但我们仍沿用早已熟知的名称——空间化学。

空间化学研究是宇宙空间各层次天体的化学组成与化学演化,是从组成物质的最基本的单元即核素与元素出发,研究各类核素与元素的起源以及在不同层次天体中的分布特征与规律及其随时间的演化,同时也研究宇宙空间各层次天体的形成与演化过程。空间化学所探讨的对象,从宇宙空间的基本粒子到星系,时间跨度从宇宙起源到现今,涉及的时间尺度为 $10^{-44} \sim 10^{17}$ s;空间尺度为 $10^{-28} \sim 10^{29}$ cm;质量为 $10^{-23} \sim 10^{45}$ g;温度由近于绝对温度零度到 10^{32} K;涉及各种物理、化学、生物和核过程。当前空间化学侧重研究的对象仍然是太阳系空间。

二、空间化学的研究范围与内容

当代空间化学的研究领域与内容可概括为以下几个主要方面。

1. 元素和核素的丰度与起源

探讨元素与核素的空间分布,首先必须探测与阐明元素与核素在各层次天体中的丰度,即研究太阳及其行星系统、恒星和宇宙源中的丰度,建立元素与核素的太阳系丰度(习惯称为宇宙丰度)模型,解释元素与核素宇宙丰度并提出元素起源的过程与场所。目前流行的元素起源理论描述了元素的合成过程,宇宙

核合成氢、氦；恒星中的氢燃烧、氦燃烧、静态和爆炸，以及碳、氧、硅燃烧等过程；超新星爆发过程产生慢中子俘获与快中子俘获过程，形成了全部元素与核素；而宇宙线与星际物质的核反应形成少量元素氢。恒星的演化阶段反映了元素的形成和演化过程。

2. 太阳系化学

当代空间化学研究的主要领域为太阳系化学，即探讨元素与核素在太阳各天体中的丰度及其演化历程。

(1) 太阳系物质的来源。太阳系的物质主要来自太阳星云。但陨石中同位素组成异常的研究也证明，在太阳星云凝聚时，有邻近超新星爆发产生的外来物质的加入，使太阳星云及其凝聚形成的天体的同位素发生变异。

(2) 太阳系星云化学元素的分馏和凝聚过程。对陨石和宇宙尘的矿物成分与微量元素的研究，提供了太阳星云中元素产生分馏、凝聚，并形成各种矿物的顺序、共生组合以及星云中温度、压力变迁的历史，由此可以推导太阳星云凝聚的物理化学过程。太阳星云不同部位的凝聚、吸积形成了太阳系中不同化学组成与内部结构的各类天体。

(3) 太阳系行星与卫星化学。太阳系行星与卫星化学主要研究太阳系各行星与卫星的化学组成与化学演化。太阳系各行星与卫星形成于太阳星云的不同区域，处于不同的演化阶段，它们在大气层组成、表面特征、物理场、地质过程、内部结构和化学组成等方面均有较大的差异。行星与卫星化学在以下几个方面的研究取得了丰硕的成果和飞速的发展：太阳星云盘内元素的分布与各行星形成区的化学成分；行星与卫星起源与形成方式；行星与卫星大气层的化学成分与演化过程；行星与卫星内部化学元素的分异、调整及各圈层的形成过程。行星与卫星化学的另一个重要方面是研究行星与卫星演化能源与热历史，即行星与卫星内部能源的产生方式、传导与释放过程。行星与卫星的能源制约着行星内部结构的演化，各种地质营力的作用以及行星与卫星的热演化历史。

(4) 太阳系的小天体化学。太阳系中彗星、小行星、陨石和宇宙尘由于个体小，母体的热变质效应低，因而保留有太阳星云初始的化学组成的特征，它们是太阳星云初始成分的代表性样品，也称为太阳系的“考古标本”。彗星化学侧重研究彗核、彗发、彗尾的化学成分、化学反应过程及其起源。小行星化学主要探测小行星的化学类型及陨石的成因。当前陨石的研究比较集中在以下几个方面：系统地研究矿物、化学成分以推演太阳星云的凝聚过程；测定同位素组成以探讨太阳系的物质来源和演化年龄，探索新元素和已“灭绝”的元素；测定宇宙成因核素及陨石矿物中的宇宙线径迹以探讨宇宙线和陨石物质的高能核反应过程及宇宙线在时间、空间上的稳定性；研究稀有气体同位素以阐明陨石母体

的热历史与宇宙线照射史。从空间探测器、高空气球、深海沉积物和古老地层中收集星际尘埃和行星际尘埃(统称宇宙尘),研究它们的粒径大小、形态特征、通量谱、化学和矿物组成,证明宇宙尘有一部分属星际尘埃物质,或是原始太阳星云的残留物,但绝大部分来自小行星、彗星和陨石的瓦解,或是当陨石穿过大气层时熔融散落的产物。太阳系小天体化学的研究对探讨太阳系的化学演化具有特殊的重要意义。

(5) 太阳系空间有机质。已被证认出的 50 多种星际分子为探索空间有机质的来源与存在状态开辟了新的途径。在碳质球粒陨石中已发现有多种氨基酸、烷烃、烯烃、芳烃、嘌呤和嘧啶等有机化合物。人工模拟有机质的合成实验,提供了这些有机质在太阳星云中的形成方式和存在状态的依据。空间有机质的研究,为探索这些最原始的有机化合物发展为具新陈代谢能力的生命物质的化学演化过程开拓了新的途径。多数研究者认为,陨石中有机质形成于太阳星云中的催化过程或放电过程,并非生物合成;也有人认为是地球以外生命物质的遗迹。

(6) 太阳系宇宙线化学。宇宙线化学研究宇宙线中元素与核素的丰度及其随时间的变化;宇宙线与天体物质相互作用及其效应尤其为人们所关注。宇宙线与行星大气、行星表面物质和陨石中的各种元素相互作用,形成近百种稳定的和放射性的宇宙成因核素。对这些核素的产率和深度分布研究表明,几千万年以来,银河系宇宙线的组成、通量和能谱基本上是稳定的;太阳活动的周期性对银河宇宙线有调制作用。陨石的宇宙线暴露年龄的频谱分析证明,行星际空间小天体之间的碰撞、瓦解和冲击变质作用是不断发生的。宇宙成因核素的研究有助于计算陨石在空间的运行轨道,并可推算陨石母体的原始形状和大小。由矿物中保存的宇宙线重核径迹,可推算宇宙线中重核的成分和能谱,论证陨石通过大气层时的飞行姿态和烧蚀量。

3. 天体撞击引起的地球灾变

天体撞击地表引起灾变的理论,能较圆满地解释生物演化过程中发生大规模灭绝的事件。大型陨石、小行星或彗星撞击地球,可以产生全球性灾变事件,引起地表环境突变、海水漫溢、冰期出现和生物大灭绝,或产生区域性灾变事件,如地球表面已确证的有 160 多个陨石撞击坑,全球的 4 次玻璃陨石事件,1906 年发生在西伯利亚的通古斯事件和冲击成矿的萨德伯里(加拿大)事件等等。发生在白垩纪末、第三纪初(6 500 万年前)的生物大灭绝事件中,有 50% 的生物属或 75% 的生物种从地球上突然消失,恐龙、菊石、箭石等都绝迹了。世界各地的白垩纪-古近纪界面上均发现有铍、铂、钨、金、铬、镍、钴等元素异常的富集。由于这些元素主要来自天体物质,因而推测是由一个直径为 10~

30 km的小行星或彗星冲击地球产生的后果。陨石坑的研究证明,大约每1亿年有一个直径为20~30 km的小行星撞击地球,这些撞击使地球产生一系列的灾变事件。

4. 宇宙年代学

为探讨元素与核素随时间演化的历程,必须测定宇宙演化重大事件的年龄,建立天体事件的时间序列。宇宙年代学的研究提供了元素与核素演化历史的时间标尺,如宇宙年龄、银河系年龄、元素年龄、太阳系年龄(包括形成间隔年龄、凝聚年龄、固结年龄)、行星和卫星各演化阶段和重大事件的年龄、陨石母体的气体保留年龄、裂变径迹保留年龄、宇宙线暴露年龄和落地年龄等。

三、空间化学、宇宙化学与天体化学

国内外有一部分学者,特别是地球科学家、天文学家和化学家,称空间化学为宇宙化学(cosmochemistry)。相对于地球化学而言,宇宙化学是在地球化学基础上发展的,是以地球化学的理论与方法来研究宇宙空间各层次天体的化学组成与化学演化。从这个角度看,宇宙化学是地球化学的分支学科。有些学者认为,从词义上理解,空间化学与宇宙化学研究范围过于空泛,为准确表述研究宇宙中各个层次天体的化学组成与化学演化,学科名称建议用“天体化学”。实质上空间化学、宇宙化学与天体化学,其研究对象、研究范围与宗旨是接近的,是天文学、空间科学、地球科学、化学与空间探测进展相互结合、交叉渗透所产生的新学科。

第二节 空间化学的发展简史

一、空间化学发展简述

19世纪初对太阳光谱的拍摄以及对陨石矿物和化学成分的研究为空间化学的诞生奠定了基础,这一研究开拓了对恒星、太阳系各天体化学组成的测定途径。1917年哈金斯(W. D. Harkins)综合了318个铁陨石和125个石陨石的化学成分,发现7种元素的丰度占98.6%,这些元素均为偶元素(质量数为偶数),提出了元素丰度的偶数律——偶元素的丰度比相邻两个元素的丰度高。1930年诺达克夫妇(I. Noddack与W. Noddack)根据大量陨石的化学成分数据,提出了元素宇宙丰度。相继于1937年戈尔德施密特(V. M. Goldschmidt)、1956年修斯(H. E. Suess)和尤里(H. C. Urey)、1957年卡梅伦(A. G. W. Cameron)等提出了元素及核素的宇宙丰度。1957年伯比奇(M. Burbidge)等提出恒星中

元素合成的假说,奠定了元素起源的现代理论的基础。

20世纪60年代以来,由于以下几方面研究的蓬勃发展,空间化学研究领域不断扩大与深化,并取得了迅猛的进展。

1. 陨石学研究的新进展

截止到1999年12月,已发现并完成鉴定的陨石共22 507块,其中降落型(falls)1 005块,发现型(finds)21 502块(其中包括17 808块南极陨石)。南极洲撒哈拉沙漠及其他一些荒漠地区发现了大量陨石,特别是19块火星陨石和21块月球陨石的发现与确证,不仅开阔了人类的视野,而且为研究火星与月球提供了丰富的矿物学、岩石学和成因演化的新论据。对陨石的多学科综合研究修正了元素丰度和元素起源的理论,发现太阳星云凝聚时有系外物质的加入,获得了对太阳系的演化历史新的时间序列,取得了宇宙线的时空变化和生命物质前期的化学演化新的实验证据;地外物质冲击地球及其滞后效应引起生物灭绝灾变事件的研究,引起了各有关学科的关注。

2. 空间化学的发展

人造地球卫星和各种行星探测器的相继发射,精确地测定了地球高层大气、地球磁场和辐射带的结构,探测了各行星大气的组成和结构、磁场与辐射带、行星表面的物理环境和化学成分以及行星的内部结构,编制了一些行星的“地质图”、“地貌图”和“构造图”,测量了行星际空间的温度、磁场、银河宇宙线和太阳风粒子的通量、能谱和成分,观测与研究了太阳系中的各类小天体。行星探测的丰硕成果,使空间化学产生了一些新的分支学科。

3. 月球的探测与研究

1959~1976年对月球进行的飞越目标、绕月飞行、月球自动车、无人和载人登月与取样,共取得382 kg月岩与月壤样品,获得了极其丰富的科学资料,在月球的形状、大小、轨道参数,月表与近月空间环境,月表月壤的物理性质、化学成分与矿物组成,月球的岩石类型、化学成分与形成年龄,月表的地形单元与地层顺序,撞击坑的类型与形成年龄,月球的内部结构与演化历史,月球的起源和地月系的相互作用与影响等方面的研究均取得了一系列突破性的进展;编制了月球的地形图、地貌图、地质构造图等;证实月壤中蕴藏有极其丰富的可供人类长期使用的核聚变原料—— ^3He 及其他有用气体,月球岩石中含有可供开采利用的Ti、Fe、O、Si、Al、K、REE和P等有用元素,为人类开发利用月球的能源与资源提供了重要的科学依据。

20世纪80年代以来,空间化学仍保持着旺盛的生命力,并展示出更为广阔的前景。当代空间化学关注的焦点领域有:

(1) 元素丰度与元素起源理论日臻完善,并将宇宙起源、星系和恒星的形

成演化与核素的成因结合起来研究,以定量论证核素宇宙丰度的起源。

(2) 建立较完善的太阳星云中元素与核素的空间分布、星云的分馏凝聚过程的模型。太阳星云中非太阳系(或称前太阳)物质的发现,进一步证实了陨石中的金刚石、碳化硅和石墨等矿物的 Xe、Ne、C、N、O、Si、Mg、Ti、Ba、Nd、Sm 等同位素异常,可能起因于邻近超新星爆发而注入。

(3) 火星陨石的研究及火星探测。已收集的 19 块火星陨石包括辉玻无球粒陨石(shergottite)、辉橄无球粒陨石(nakhite)、纯橄无球粒陨石(cassignite,简称 SNC 陨石),以及新发现的斜方辉石无球粒陨石(orthopyroxenite)。ALH84001 是唯一已知的斜方辉石无球粒陨石。该陨石结晶年龄为 45.6 亿年。ALH84001 陨石的碳酸盐脉中的磁铁矿和黄铁矿在显微形态和化学组成特征上与地球细菌成因相似,有可能是古老的火星细菌化石,在碳酸盐脉中还发现有机化合物(多环芳烃)。ALH84001 的报导曾轰动了整个科技界,虽然有不少证据否认古老的火星生命化石,但却推动了探索火星曾存在过生命的新高潮。1976 年“海盗”1 号和 2 号曾经在火星表面软着陆,获得有关火星大气的成分与大气活动、表面环境、土壤成分等一系列新资料。1997 年“火星探路者”号在火星战神谷的河床口登陆,向地球发回了 1 万多张高清晰图片、400 万个火星大气的温度、压力、风速等数据,十几个岩石和土壤的现场化学分析数据以及重力、土壤机械性质和磁属性质等大量资料;火星的土壤和岩石具有高硅、钾而低镁的特征,火星壳的成分接近安山岩;火星可能有一个半径为 1 300 ~ 2 000 km 的金属核。今后的火星探测将关注以下科学目标:进一步探测火星磁层、电离层、磁场与重力场;分析火星大气层的成分、结构、气象和气候特征,探测火星的地形、地貌与地质构造,分析火星土壤与岩石的矿物与化学成分,探测火星极地水冰和干冰的分布与变化,以及可能存在的地下水源,研究火星内部结构,取回火星土壤与岩石样品,寻找火星存在过生命的证据。

(4) 月球探测与月球化学研究。自 1986 年提出重返月球建立月球基地的设想之后,美国、欧洲空间局、俄罗斯及日本等国相继提出了新的月球探测计划。重返月球的科学目标集中在以下几个方面:开发和利用月球的能源、资源与环境,建立月球对地监测站、科学实验站、天文观测站、深空探测前哨站和转运站,深化人类对月球、地球和太阳系的认识。1994 年的克莱门汀号(clementine)及 1998 的月球勘探者号(lunar prospector)探测器的环月飞行,揭开了重返月球的序幕,获得了大量极高分辨率的月球地形图以及月球表面的铀、钍、钾、铁、稀土元素分布图,发现月球极地及中纬地区撞击坑内的永久阴影区的月壤中含有 0.3% ~ 1.0% (质量分数)的水冰,估计水冰的总储量为 60 亿 ~ 100 亿 t。重返月球阶段人类最为关注的领域是月球能源与资源的分布与开发