

行星科学和深空探测研究与发展*

廖新浩

(中国科学院上海天文台 上海 200023)

摘要 文章介绍了行星科学已取得的重要研究进展和当前存在的主要科学问题,对未来我国行星科学和深空探测研究与发展提出了若干建议。

关键词 行星科学,深空探测,研究与发展

DOI:10.3969/j.issn.1000-3045.2011.05.003



廖新浩研究员

1 研究背景 和意义

行星科学是天文学一个二级学科,主要研究行星及其卫星、矮行星、小行星、彗星、流星等太阳系小天体性质、构造、运动过程及

其起源和演化,同时搜寻太阳系外行星系统和研究其特征;涉及行星物理学、行星化学、行星地质学和行星生物学等分支学科。国际天文学联合会(IAU)专门为行星科学设立了行星系统科学部,其涉及IAU下属7个科学专业委员会和两个工作组。特别地,为应对近地小天体对地球造成碰撞灾害,IAU执行委员会还专门下设了“近地天体灾害咨询委员会”。

随着众多深空探测计划的相继实施和

系外行星的不断发现(到2010年底,人们已向太空发射了250多个深空探测器,以及发现了500多颗太阳系外行星),人们获得了更全面的测量数据资料 and 新的研究样本,有关行星科学的新发现和新的研究成果日益增多,将行星科学的研究推进到一个新的发展时期。

行星是天体形成和演化的重要类型,它是在宇宙演化到一定时间后形成的。与星系宇宙以及恒星不同,行星由于其质量相对小,因此其演化也有其特殊的过程。行星科学研究是人类全面认识宇宙演化过程不可缺少的环节,它是国际天文学的重要分支学科。

行星科学研究促进了天文学与地球科学的交叉发展。地球是太阳系内一颗特殊行星,与其在物质性态和结构类似的大行星还有水星、金星和火星,通常将它们一起称为类地行星。研究其他类地行星形成和演化过程,有助于人们从更宽的角度认识地球,例如通过类地行星的比较研究,可以加深对地球大气环流产生和维持机制的认识;反之,地球是人类观测和研究最深入的行星,在地

* 收稿日期:2011年8月19日

球科学研究中形成的理论和方法也可以用于其他类地行星的研究^[4]。

行星科学研究是推动天文空间测量技术进步的主要动力之一。行星科学研究除了基于地球上的观测设备,目前最有成效的观测手段是基于空间探测器直接飞临行星对其开展探测,由此获得更全面、更直接和更可靠的数据资料,可以说行星科学的发展离不开天文空间测量技术的发展。天文空间测量技术包含卫星发射技术、卫星地面跟踪技术、卫星平台和有效载荷(科学探测仪器设备)技术等。人类对行星科学中未知问题的探求,对天文空间测量技术不断提出新的需求,从而推动了天文空间测量技术的不断进步。

行星科学研究有着重要社会应用价值。人类在不远的将来一定面临资源严重短缺问题,特别是能源和矿物,而行星可能是人类获取这些短缺资源的可行来源,因此人类需要对行星有深入、全面和科学的了解;太阳系小天体撞击行星事件无论在其他行星上还是在地球上均有发生,人类为了自身的安全,需要对行星撞击事件加以研究,提出减少灾害的办法。

2 研究进展及其重要成果

与行星科学相关的深空探测计划始于上个世纪 50 年代末,典型代表是美国从 1961—1972 年间实施的阿波罗月球探测工程计划。到目前为止,美国、欧洲、俄罗斯、中国和日本几个航空航天大国先后发射了约 250 多个空间探测器(其中大多数是针对月球、火星与金星,约占 75%),分别对月球、大行星及其卫星、小行星和彗星进行过探测,基本涵盖了太阳系内各类天体,特别是每颗大行星均有探测器达到过,还有探测器在月球和火星上成功着落并开展有效的探测工作,获得了众多科学新发现。

通过“火星环球勘测者号(NASA)”测

量资料,获得了火星地质地貌图,建立了高精度重力场模型,推测出火星可能存在一个液体的核^[3,13,17,19]。“火星探路者号(NASA)”对火星表面土壤及岩石进行了 20 多种元素成份和含量的分析,拍摄到因风暴产生的尘埃在空中流动现象,通过地表观测资料分析推断火星过去可能是温暖和湿润行星^[7,18]。“火星快车号(ESA)”在火星赤道附近发现了大片的氧化铁沉积层,探测到火星地表下有潮湿和较温暖的空间存在的迹象,绘制出火星极光图,对火星上曾经有河流存在的假说进行了进一步证实^[12]。“伽利略号(NASA)”发现了小行星 Ida 的卫星 Dactyl,首次发现了木卫一(Io)和木卫三(Ganymede)有内在磁场^[5,8-10,15,16];根据其观测资料推断出木卫二(Europa)可能存在一个约 10 公里厚的内部海洋;特别是在其坠落木星大气过程中测量到 57 分钟 0—22bar 的大气速度变化值,极大地提升了人们对木星大气的了解程度^[6,11,20]。“旅行者 1 号(NASA)”首次发现木卫一上的火山活动,探测到土星环的复杂结构,并发现了土卫六拥有浓密的大气层。“卡西尼-惠更斯号(NASA&ESA)”探测器探测到了土星大气中会发生很强的闪电和飓风现象,发现了土卫二上间歇泉喷发出的物质中含有液态水的证据,探测到土星 G 与 E 环之间仍存在一个行星环,首度证明在土卫六的北极附近存在碳氢化合物的湖泊,发现了土星 4 颗新的卫星和大气赤道带环流速度在明显变慢(从 1996 年的 400m/s 到 2004 年的 275m/s)^[14]。

未来一段时间内,由于人类社会发展的需求,使得月球、火星、小行星、彗星、金星和木星以及系外行星成为国际深空探测的主要对象。

近地小行星和彗星探测与危险评估是太阳系探测研究的重要内容。这类天体总数估计在几万颗以上,已发现的不到 1 000



中国科学院

颗。研究表明,直径大于 200 米的近地天体撞击地球的事件平均每 47 000 年发生 1 次。近年来也多次发现小行星在月球距离或更近的距离上掠过地球,已知的碰撞危险程度最高的 3 个小行星是 2004VD17、2004MN4 和 1997XR2。对近地小天体的探测,目前国际上不仅基于地面设备,还实施了一些深空探测计划,如美国 NEAR、欧空局 ROSETTA 和日本 Hayabusa 项目等。当前,更高精度观测设备和更多观测时间投入是近地小天体探测研究的核心问题。

地球是一颗特殊的行星,人们对其探测方法和研究结果可以扩展到其他行星上去。因此以空间测量技术为实验手段,从天文的角度,更精确地监测和研究地球整体以及地球各圈层的物质运动,引起了天文学和地球科学的共同关注,由此形成了天文地球动力学这门新兴交叉学科。全球导航定位系统、海洋测高和重力卫星是天文地球动力学研究发展出来的 3 个代表性的卫星测量技术。通过重力卫星 GRACE 测量数据,科学家确定地球两极的冰川融化速度,由此结合海洋测高数据,给出了由于冰川融化引起的全球海平面升高量,引起了国际社会的高度关注;通过无线电测量信号的精密测量,科学家可以高精度测量地球大气电子和水汽含量,同时也已用于对行星的大气测量。美国 NASA 于 2002 年制定的“NASA 固体地球科学计划”,为未来 25 年空间对地观测确定了最优先的研究领域和科学问题。探索对地观测系统的新技术、新方法,使测量的精度、时间和空间分辨率不断提高,是天文地球动力学研究未来发展的主题。

2007 年 10 月和 2010 年 10 月,我国的探月计划“嫦娥一号”和“嫦娥二号”已相继成功发射。“中国-俄罗斯联合探测火星计划”也正在实施,中国负责研制“萤火一号(YH-1)”火星探测器计划于 2011 年发射。

中科院国家天文台是我国“嫦娥探月”工程“科学应用系统”主持单位,利用我国探测器携带的激光高度计测量数据,成功地绘出了完整月球三维地形图。上海天文台参加了“嫦娥一号”工程并承担和完成了相关的 VLBI 测定轨任务,目前正在执行“萤火一号”轨道测定科研任务。中科院空间科学与应用研究中心在我国探月工程、地球空间双星探测计划和多颗应用卫星的有效载荷方面开展了富有成效的工作,也是我国“萤火一号”火星探测器科学应用的负责单位,将在火星大气、引力场等方面开展具体研究工作。

中科院紫金山天文台在哈雷彗星回归、彗木相撞事件、海尔-波谱彗星、狮子座流星群等研究方面取得了一些重要成果;在原始碳质球粒陨石中首次发现了短寿期放射性核素 ^{36}Cl (半衰期为 30 万年)的证据,提出并论证了太阳系早期高强度高能粒子的辐射是产生 ^{36}Cl 的主要原因,得到了国际学术界的广泛认同。中科院上海天文台行星物理研究小组开展行星内部动力学基础研究已有数年,在理论和大规模数值模拟研究方面取得若干新进展,获得了国际同行的关注。中国科学技术大学地球与空间物理系行星磁层研究小组已在等离子体对流机制研究方面取得了国际关注的研究成果。

紫金山天文台在小行星和彗星观测研究成绩突出,发现了很多颗这类小天体;特别地,紫金山天文台已在盱眙观测基地建成了 1.04/1.20 米近地天体望远镜,专门用于搜索发现近地天体。

我国早在 20 世纪 70 年代就开始瞄准天文地球动力学这个国际前沿交叉领域,不仅参与了国际上主要空间对地观测计划(如国际地球自转服务计划(IERS)、国际 GPS 地球动力学服务计划(IGS)、国际激光测距服务计划(ILRS)、欧洲 VLBI 观测网(EVN)、美

国 NASA 的固体地球和自然灾害研究计划 (SENH) 等), 而且倡导并组织了由中国、美国、日本、俄罗斯、韩国、印度等十几个国家参加的亚太地区空间地球动力学 (APSG) 国际合作研究计划, 使我国成为国际天文地球动力学研究的重要基地。自上世纪 70 年代起上海天文台相继建成了卫星激光测距技术 (SLR)、甚长基线干涉测量技术 (VLBI) 和全球卫星定位技术 (GPS), 使上海天文台成为同时拥有这些设备的重要观测基地, 同时也开发了相应的独立自主的资料分析软件系统, 拥有了综合处理多卫星和多技术测量资料的能力, 使其在国际相关学术组织中占有重要学术地位。上海天文台利用空间大地测量数据, 在国际上首次得到了精度达毫米级的中国大陆及其周边区域地壳运动完整的运动图像。

3 面临的问题

IAU 行星科学部 2010 年已有注册会员 1 167 名, 但我国大陆在其注册的正式会员不到 10 名。与国际上相比, 我国从事深空探测的工程技术人员不少, 但从事探测数据科学研究的人员却相对少得多, 特别是从事行星物理和行星化学的研究人员就更少, 与我国目前航空航天在国际上的地位非常不符。我国深空科学探测起步晚是其客观原因, 但也反映了国家以前在诸如人才和经费等政策上支持力度不够。从事行星科学研究的人员不足, 将极大地影响我国未来深空探测计划开展的水平和质量。目前, 当务之急是培养和发展从事深空探测科学研究的队伍。

我国行星科学与深空探测目前主要不足是: 探测器跟踪测量技术能力还达不到国际先进水平; 探测器上的科学测量设备精度和水平与国际同类设备仍有差距; 深空探测资料的分析处理和科学应用研究水平还有待进一步提高。

我国行星深空探测工作刚刚起步, 行星

科学研究的基础有待加强, 在思想、技术、设备、管理、经费和人才资源等方面与国际空间大国均有一定差距。目前, 月球、火星和小行星是探测的热点, 国际上已实施和筹备了很多探测计划, 想做和能做的工作都已经做了或已在计划中。就我国目前深空探测能力而言, 要想在这个领域完成其他空间大国想做但目前还做不了的工作, 难度较大。我国应扬长避短, 集中有限的物力、财力和人力, 加强在科学目标方面的研究, 开展全新的深空探测活动。

当前行星科学和深空探测的主要科学问题有:

3.1 行星物理和行星化学

行星内部结构和重力场: 类地行星的内部结构比较研究, 火星内部液核的存在性, 热分布对类地行星内部结构的影响, 高精度月球重力场, 高精度火星重力场, 重力场与地形的相关性, 火星重力场的时变性, 重力场反演方法, 类地行星的形变;

行星内部动力学: 行星内部对流及其产生机制, 快速旋转流体与磁流体动力学基本理论, 月球内部热演化与磁场消失的关系, 水星和火星内部热演化及其磁流体动力学, 木星和土星大气动力学, 自然卫星内部流体动力学, 较差转动产生及其对行星内部动力学的影响, 太阳系外共旋行星内部热对流, 潮汐作用与行星内部物质运动, 行星内部弹性动力学;

行星磁场物理: 行星际空间等离子体与太阳风相互作用基本理论, 水星磁层物理, 金星磁层物理, 火星磁层物理, 木星磁层物理, 类地行星空间环境辐射模拟平台, 火星大气参数的测定与模型建立, 金星大气参数的测定与模型建立, 类地行星大气水输运过程及其消失;

行星表面物理: 小行星反照率和反射光



中国科学院

谱特性,小行星表面物质特性统计比较研究,行星表面陨击坑和多环盆地的形成,彗星物质喷发性态,流体行星表面撞击及风暴的形成,行星表面地形,小行星物理参数反演方法和形状重建;

行星化学:太阳系早期短寿期放射性核素搜寻,原始球粒陨石中的恒星尘埃的同位素组成,球粒陨石中的难熔包体和球粒的成因,无球粒分异陨石和铁陨石中的微量元素及同位素组成;月球陨石和火星陨石的矿物岩石学,碳质球粒陨石中有机物的种类和含量。

3.2 太阳系小天体探测

地面探测设备:现有地面光学探测终端设备工作性能,小行星无线电探测技术方法,海量测量资料数据库建立、管理与应用,测量数据资料分析处理方法;近地小天体轨道的精密确定和预报;

空间探测设备:小行星空间探测器光学和无线电载荷关键技术方法,空间探测资料的分析和处理,空间探测具体小天体目标的遴选;

撞击概率与危害评估:小天体撞击地球概率,小天体撞击地球危害性模拟和评估,流星的形成和演化,流星群对航天安全性评估。

3.3 行星深空探测

探测器跟踪测量技术方法与位置和轨道确定:高精度测距技术,高精度测角技术,高精度测速技术,高精度行星表面定位技术,测量数据系统误差分析,测量数据融合,实时数据处理分析,无拖曳航天技术,行星际自主导航技术,编队飞行技术,高质量测量数据传输,卫星姿态变化与控制,探测器轨道设计;

深空探测科学载荷关键技术:光学及红外成像,光谱测量,雷达测量,干涉测量,星

间链路无线电和激光测量,高能粒子探测,磁强度测量,掩星无线电测量;

深空探测科学数据处理:数据库的建立和管理,数据分析处理;

深空探测科学目标遴选:月球探测,火星探测,太阳系其他天体探测。

3.4 天文地球动力学

卫星对地观测系统的新技术和新方法:导航系统的精密定轨和时间同步,多波段、多倾角干涉测量模式的研究,对流层延迟误差改正,InSAR 技术,GNSS 掩星观测,卫星重力测量技术、卫星测高技术,测量数据综合分析处理;

空间大地测量前沿科学问题:地球海洋质量分布与迁移,地球陆地表层大质量水迁移,地球大气参数运动模式,地球电离层模式,地球重力场的时变及其机制,地球自转动力学,地球内部圈层相互作用动力学,高精度地球参考架建立和维持,冰川熔化和冰后地壳回弹,垂线变化与大地水准面形变;

在深空探测中扩展应用:月球和类地行星参考架的建立与维持,月球和类地行星大地水准面的测定,月球和类地行星重力场测定,月球和类地行星电离层的测定,月球和类地行星自转参数测定,月球和类地行星内部结构反演,空间大地测量技术方法的扩展应用。

4 举措和建议

根据国际行星科学与深空探测的发展趋势,结合我国目前科研和工程技术水平的实际状况,建议中科院在下属相关天文台和研究机构尽早建立行星科学研究组(部、系或学院),针对月球、火星、小行星、彗星、金星和木星的深空探测计划,凝练出我国未来深空探测计划科学目标为主攻方向,重点开展深空探测技术方法、探测资料分析应用和前沿行星科学问题等方面研究,同时积极开

展天文地球动力学研究。在行星物理和行星化学方面, 优先开展行星内部结构与动力学、行星表面物理、行星磁场物理和行星化学研究; 在小行星探测方面, 优先开展近地小天体探测和危险性评估研究, 完善地面监测网功能和提升测量水平和效率; 在行星深空探测方面, 优先开展探测器轨道或在行星表面位置测定的技术和方法研究, 提升探测数据分析处理和科学应用的水平; 在天文地球动力学方面, 优先开展现代重力卫星跟踪测量技术, 其中高精度距离测量方法将为我国未来的深空探测计划提供坚实的技术基础。

目前, 国际行星科学与深空探测的主要科学目标集中于: 探测和研究行星地质地貌结构, 寻找行星上水存在的证据、探测太阳系形成初期物质元素组成、探测和研究行星形成与演化的物理和化学过程, 探索行星与人类未来的关系等。根据我国目前实际情况, 应特别加强行星科学基础研究与深空探测实际计划的结合, 形成有科学目标牵引具体深空探测项目, 逐步健全和完善我国行星学科分支学科研究体系和提升空间探测仪器设备测量水平是两个需要重点解决的问题。为此建议未来 5—10 年, 要注重两支队伍的建设, 一是建立若干个行星科学研究团队, 二是深空探测关键技术攻关团队。围绕下述重点发展方向开展工作:

(1) 月球和火星探测。我国已制定了在 2020 年前实现“绕月飞行、软着陆探测、取样返回”的月球探测发展计划, 确定了于 2011 年发射“萤火一号”火星探测器。月球是距离地球最近的太阳系天体, 通过对其探测可以帮助了解其形成和演化历史; 火星是太阳系中与地球最相似的行星, 与地球相距也不远, 它是太阳系中除地球之外可能存在生命的行星之一。

(2) 小行星与彗星的探测。小行星和彗

星包含了太阳系形成初期的原始物质, 它们是研究太阳系形成和演化不可缺少的太阳系天体。同时探测其目前的轨道, 可以评估其撞击地球的危险性。

(3) 木星探测的预研。木星是研究气态巨行星的最好天体, 它不仅具有内在磁场, 还有复杂的大气运动, 同时还有性态各异的天然卫星系统。对其研究, 可以加深对太阳系形成和演化的理解。

(4) 空间对地观测技术的扩展应用。人们已建立了较完善的空间对地球观测系统, 其中一些探测方法可以扩展到其他行星的探测上去; 充分利用空间对地观测技术是深空探测技术发展的有效途径。

(5) 行星形成和演化计算机模拟研究。计算机的快速发展, 使之在科学研究中成为了一种有效的实验手段, 在一些情况下, 特别是天体对应的极端物理和化学条件下, 计算机模拟成了唯一的实验手段, 它也是对深空探测手段的补充。

主要参考文献

- 1 中国科学技术协会主编, 中国天文学会编著. 2007—2008 天文学学科发展报告. 北京: 中国科学技术出版社, 2008.
- 2 国家自然科学基金委员会数学物理科学部. 天文学、数学学科发展研究报告. 北京: 科学出版社, 2008.
- 3 Acuna M H et al. Global Distribution of Crustal Magnetism Discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER Experiment. *Science*, 1999, 284: 790-793.
- 4 Anderson D L. *New Theory of the Earth*. Cambridge: Cambridge University Press. 2007.
- 5 Bloxham J. Sensitivity of the geomagnetic axial dipole to thermal core-mantle interactions. *Nature*, 2000, 405(6782): 63-65.
- 6 Busse F H. Thermal instabilities in rapidly rotating



中国科学院

- systems. *J Fluid Mech*, 1970, 44: 441-460.
- 7 Connerney J E P et al. Magnetic Lineations in the Ancient Crust of Mars. *Science*, 1999, 284: 794-798.
 - 8 Christensen U R. A deep dynamo generating Mercury's magnetic field. *Nature*, 2006, 444: 1 056-1 058.
 - 9 Glatzmaier G A, Roberts P H. A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. *Nature*, 1995, 377:203-209.
 - 10 Gubbins D, Bloxham J. Morphology of the geomagnetic field and implications for the geodynamo. *Nature*, 1987, 325: 509-511.
 - 11 Heimpel M, Aurnou J, Wicht J. Simulation of equatorial and high- latitude jets on Jupiter in a deep convection model. *Nature*, 2005, 438: 193-196.
 - 12 Lundin R et al. Solar Wind-Induced Atmospheric Erosion at Mars: First Results from ASPERA-3 on Mars Express. *Science*, 2004, 305: 1 933-1 936.
 - 13 Margot J L et al. Large Longitude Libration of Mercury Reveals a Molten Core. *Science*, 2007, 316:710-714.
 - 14 Porco C C et al. Cassini Imaging Science: Initial Results on Saturn's Atmosphere. *Science*, 2005, 307: 1 243-1 247.
 - 15 Sarson G, Jones C A, Zhang K et al. Magnetoconvection Dynamos and the Magnetic Fields of Io and Ganymede. *Science*, 1997,276: 1 106-1 108.
 - 16 Schubert G, Zhang K, Kivelson M G et al. The magnetic field and internal structure of Ganymede. *Nature*, 1996, 384: 544-545.
 - 17 Stevenson D J. Mars' core and magnetism. *Nature*, 2001, 412, 214-219.
 - 18 Stewart A J et al. Mars: A New Core-Crystallization Regime. *Science*, 2007, 316, 1 323-1 325.
 - 19 Yoder C F et al. Fluid Core Size of Mars from Detection of the Solar Tide. *Science*, 2003, 300, 299-303.
 - 20 Zhang K. Schubert G. Teleconvection: Remotely driven thermal convection in rotating stratified spherical layers. *Science*, 2000, 290: 1 944-1 947.

Research and Development of Planetary Sciences and Deep Space Exploration

Liao Xinhao

(Shanghai Astronomical Observatory, CAS 200023 Shanghai)

Abstract In this paper, some important research progresses and problems of planetary sciences are introduced, and some suggestions are made for the research and development of planetary sciences and deep space exploration in Chinese Academy of Sciences in the future.

Keywords planetary science, deep space exploration, research and development

廖新浩 中国科学院上海天文台副台长,研究员,博士生导师。1961年出生。1989年获南京大学理学博士学位。1989年7月—1997年6月在南京大学天文系任教,1997年7月调入上海天文台工作至今。长期从事天文动力学基础理论研究,主要包括:行星轨道运动理论、行星内部流体与磁流体动力学以及行星自转动力学等,已发表学术论文近百篇。E-mail: xhliao@shao.ac.cn