

月球探测进展与我国的探月行动(上)

欧阳自远

中国科学院院士, 第三世界科学院院士 绕月探测工程首席科学家; 中国科学院地球化学研究所/中国科学院国家天文台, 北京 100012

关键词 月球探测 嫦娥一号绕月探测卫星 中国月球探测工程

月球探测是中国的航天事业在卫星应用和载人航天取得历史性成就的基础上向深空探测领域迈出的第一步。本文详细回顾了人类探测月球的历程与探测成果、21世纪初月球探测的发展趋势与前景; 介绍了我国月球探测的发展战略和各阶段科学目标, 尤其是正在实施的“嫦娥一号”绕月探测工程的科学目标。(编者按: 由于本文篇幅较长, 故分两次刊发)

1 人类航天活动的三个主要领域

1.1 卫星应用

据不完全统计表明, 人类迄今为止共发射了5 000多个航天器, 如气象卫星、通讯卫星、资源卫星、技术试验卫星、间谍卫星等等, 中国约占1%的份额。现在所发射和运营中的卫星在资源勘察、气象和灾害预报、全球广播电视通讯、导航定位、军事等领域已得到广泛应用。航天科技的发展已经渗透到经济和社会生活的各个方面, 大大提高了我们的生活质量, 并有力推动了相关产业的快速发展。



图1 中国1988年9月7日发射的第一颗气象卫星——“风云一号”太阳同步轨道气象卫星

1.2 载人航天

至今共有950多人进入过太空, 2004年杨利伟成为中国第一位进入太空的宇航员, 这是我国航天事业取得的重大成就。按照计划, 美国、俄罗斯、日本等16个国家将联合起来, 到2010年建成国际空间站, 进行生命科学、空间科学、航天医学、微重力试验、商业产品开发等一系列的基础科学和应用开发研究。

1.3 深空探测

深空探测是指脱离地球引力场, 进入太阳系空间和宇宙空间的探测。深空探测是在卫星应用和载人航天取得重大成就的基础上, 向更广阔的太阳系空间进行的探索, 是人类社会的物质和精神文明发展的需要, 是科学技术进步的必然趋势, 将服务于人类社会的可持续发展。目前的深空探测目标以太阳系空间为主, 主要集中在4个重点领域:

一是月球探测。这是深空探测的门槛, 因为月球是离我们最近的天体, 月球可以作为对地监测基地、科学研究基地、新的军事平台以及深空探测的前哨站和转运站。科学家们正在评估月球的资源和能源的开发利用前景, 在不远的将来, 这些资源和能源将作为地球可持续发展的重要补充。

二是火星探测。火星是一个类似地球的行星, 可以和地球进行对比研究。当前, 火星探测的主要目的不是寻找火星上是否存在生命, 因为现在已经基本确认如今的火星表面没有水体和生命的活动, 因此火星探测的主要目标在于寻找过去是否存在水体和生命活动的证据, 探索生命起源、行星和太阳系的起源与演化。当然现在

在火星上找到了很多曾经存在水体的间接证据,但是仍然不能确认什么时候曾经有过水,更不知道是否有过生命。所以火星探测还要走很漫长的道路。

三是巨行星的卫星探测。包括土卫六、木卫二、木卫三等。这些巨行星的卫星一般相当于地球大小,探测的主要目的也是为了探测水体和是否可能发育过生命,从而探索生命起源和太阳系的起源与演化。

四是小行星与彗星的探测。小行星与彗星是组成太阳系的原始物质,对它们的探测在于探索太阳系的起源与演化,研究和制定防止小天体撞击地球的方案,探讨小行星和彗星可能的开发利用前景。

因此,21世纪将是人类全面探测太阳系,并为人类社会可持续发展服务的新时代。

2 月球探测的历程与探测成果

自古以来,人们就对月球寄予了真情期望的遐想和充满诗意的赞美。古代,当一轮皎洁如玉的明月挂在夜空,人们只能靠肉眼观察月球并寄托自己的想象。直到16世纪伽利略发明望远镜以后,人类才能够用望远镜观察月球,但观测的空间分辨率大于10 km。通过观察,人们发现月球上有高山和广阔的平原,并布满了环形山。

对月球的真正了解是在20世纪50年代以后,月球探测进入空间探测阶段。月球作为距离地球最近的天体,亮度也仅次于太阳,历来是人类天文活动的首选目标,自然也是人类走出地球摇篮,迈向浩瀚宇宙的第一步。1958年至1972年,美国和前苏联成功发射了45个月球探测器。前苏联的“月球号”成功地拍摄了月球背面的照片,第一次把月球的整个面貌展现在人们面前。1969年,阿波罗11号实现了人类的梦想,人类的足迹第一次踏上了月球。通过实地考察,人们才逐步了解到月球的真实面貌。

2.1 第一次探月高潮(1959年—1976年)

2.1.1 第一次探月高潮概况

在冷战背景下,美国和前苏联展开了以月球探测为中心的空间竞赛,掀起了第一次月球探测高潮。自1958年至1976年,美国和前苏联共发射83个月球探测器,其中成功发射45个,成功率为55.5%。1969年7月,美国的阿波罗11号飞船实现了首次载人登月。接着,阿波罗12号、14号、15号、16号、17号进行了载人登月取样,前苏联的“月球”16号、20号和24号进行了不载人登月取样,共获得了382 kg的月球样品以及海量的科学数据。月球探测取得了划时代的成就。

月球探测是人类进行太阳系探测的历史性开端,大大促进了人类对月球、地球和太阳系的认识,带动了一系列基础科学的创新,促进了一系列应用科学的新发展。月球探测,尤其是载人登月是人类迈出地球摇篮的第一步,是整个人类历史进程的里程碑。人类在宇宙空间展示的智慧创举、超强能力和攀登精神,是人类开拓进取、求实创新的光辉范例,增强了人类探索宇宙、建设好地球家园的信心。月球探测成为人类历史尤其是科学技术发展史上划时代的标志性事件。

第一次月球探测高潮的最主要推动力是冷战和空间霸权争夺的政治需求。美国和前苏联正是通过月球探测,建立和完善了庞大的航天工业和技术体系;有力地带动和促进了一系列科学技术的快速发展;月球探测技术在军事和民用领域得到延伸、推广和二次开发,形成了一大批高科技工业群体,包括微电子、计算机、遥感、遥测与遥控、微波雷达、红外与激光、超低温、超高温和超高真空技术以及冶金、化工、机械、电子视听声像和信息传递等,产生了显著的社会经济效益。据不完全统计,从阿波罗计划派生出了大约3000多种应用技术成果。在载人登月后的短短几年内,这些应用技术就取得了巨大的效益——在登月计划中每投入1美元就获得了4~5美元的产出。

2.1.2 第一次探月高潮取得的成果

人类通过对月球的探测,获得了极其丰富的数据,对月球的形状、大小、轨道参数、近月空间环境、月表结构与特征、月球的岩石类型与化学组成、月球的资源与能源、月球的内部结构与演化历史等的研究取得了一系列突破性进展,对月球的起源和地月系统的相互作用与影响获得了新的认识,主要体现在以下几个方面:

(1)精确测定了月球的形状、大小和运行轨道。月球是一个南北极稍扁、赤道处略鼓的圆球体,极半径比赤道半径短约500 m。月球的平均直径为3476 km,相当于地球直径的27%;质量为 7.35×10^{22} kg,约为地球的1/81;体积只有地球的1/49。月球的表面积约为 3.8×10^7 km²,只有地球表面积的1/14,大约相当于中国陆地面积的4倍;月球的平均密度为3.34 g/cm³,比地球的平均密度(5.52 g/cm³)小得多;月球表面的引力也只有地球表面的1/6。月球围绕着地球以椭圆形轨道运动,其远地点距离地球406700 km,近地点距离地球356400 km,与地球的平均距离为384403 km,大约相当于地球赤道长度的10倍。

(2)月球表面基本上没有大气,表面气压仅为 10^{-14} 大气压量级。由于没有大气的热传导,月表白昼的平均温度为107℃,夜晚为-153℃;向阳面的温度为120

℃,背阳面为-150℃;夜晚和太阳不能照射到的阴影区的温度仅为-160~-180℃;月表的最低温度-180℃,最高温度130℃,所以昼夜温差可以达到300℃以上。

作为比较,火星有非常稀薄的大气,火星表面平均温度为-33℃,昼夜温差大于100℃,夏季温度达到17~22℃,冬季为-123~-133℃。火星表面温度及气压快速波动,在几分钟内地表的温度变化可达20℃,气压变化也同样明显。所以火星也是一个比较严酷的、不利于人类生存的星球。

月球表面是超高真空,而火星表面有非常稀薄的大气,相当于地球表面40 km高度的大气密度。所以,天体的质量决定了它表面的气体密度,行星的质量愈小,对气体的俘获能力愈小,行星大气层愈稀薄。

(3)尽管月球现在没有明显的磁场存在,但月球的岩石有极微弱的剩磁,磁化强度约 $(2\sim 4)\times 10^{-6}$ 电磁单位/克,这表明月球可能曾经有过较弱的全球性偶极磁场。磁场的产生是由于在天体内部有带电流体的流动,而月球里面根本没有带电流体的流动,所以就没有磁场产生。因此可以推断月球在31亿年前磁场就消失了,那时月球内部就接近固化了,也就是说现在的月球其实是绕着地球旋转的僵死天体,早就终结了月球本身内部活动的生命。

比较而言,火星的磁场不像地球有很强的南北极磁场,是一大堆小磁场,即多极子弱磁场。所以火星的能量接近衰竭,相当于进入了老年阶段。

行星本身有起源、演化和衰亡的过程。行星质量愈小,内部愈早固化,愈早终结演化。行星磁场的演化趋

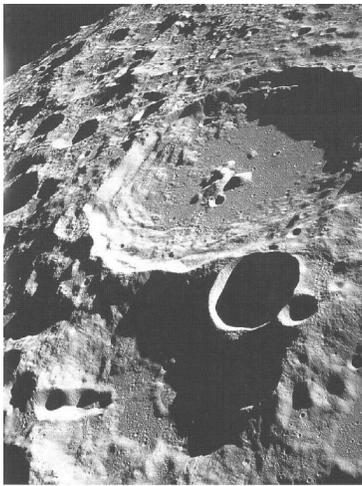


图2 月球表面密密麻麻的撞击坑

势为:偶极子磁场(如地球)→多极子弱磁场(如火星)→无磁场(如月球)。行星的衰亡是指内部能量的衰竭,而不是指表面,比如地球生机勃勃的表面是由太阳控制的。地球终究有一天会走到生命的终结,而宁静地“死”去。届时,地球上将不再有地震,没有海啸,没有火山,内部能量衰竭,地球将会更安静,但是表面也许会更繁荣。

(4)月球表面的主要地形单元为月海、月陆和撞击坑。月海是指地形相对低洼的大型盆地,月球正面(面向地球的一面)的月海约占正面面积的一半,背面(背向地球的一面)月海分布较少。月陆也称高地,是月面最古老的地形单元,高地物质大部分是富含斜长石的深成岩。月球上的撞击坑实际上是小天体撞击出来的坑。据统计,月面上直径大于1 km的撞击坑总数在33 000个以上,总面积约占月球表面积的7%~10%;直径大于1 m的月坑总数可达3亿万个。月球用自己的身体挡住了很多本该砸向地球的小天体,自己则被砸成千疮百孔,为保卫地球起了很重要的作用。小天体撞击作用导致大量岩石碎块溅射并堆积在盆地周围,形成围绕月海的山系。

(5)几乎整个月球表面覆盖着一层由岩石碎屑和尘埃组成的风化层——月壤。与地球土壤的形成不同的是,月壤是在月球地质历史时期由无数陨石撞击所形成。月海月壤一般厚4~5 m,月陆月壤一般厚8~10 m。由于长期接受太阳和宇宙射线的辐射,因而储存了独特的太阳辐射历史,完整地记录了40亿年太阳活动的历史,这对了解地球上气候的变化是非常重要的。太阳和宇宙射线的辐射将挥发性化学元素和同位素如H、He、N、C等注入月壤,并逐渐富集。初步估算全月球月壤中氦-3(^3He)的资源量可达100~500万吨。氦-3是人类未来可长期使用、清洁、安全而廉价的可控核聚变燃料,开采氦-3过程中的其他副产品如氢、氮、二氧化碳等也将是月球基地生命保障体系的重要资源。

(6)月球表面没有水体,月球的地质演化历史中也没有水或只有极少量的水参与。20世纪90年代的月球探测结果表明,月球南北两极的永久阴影区可能存在水冰。这些水冰可能是彗星撞击月球后残留下来的,并在撞击坑内太阳永远照射不到的永久阴影区中得以长期保存。据初步估算,月球表面总共大约有66亿吨水冰。但我们认为月球表面的水冰毫无价值,并没有给人们带来任何乐观的前景,这并不是说以后登月可以不带水了,主要是因为月壤中的水冰含量太低,收集和加工的代价太大。

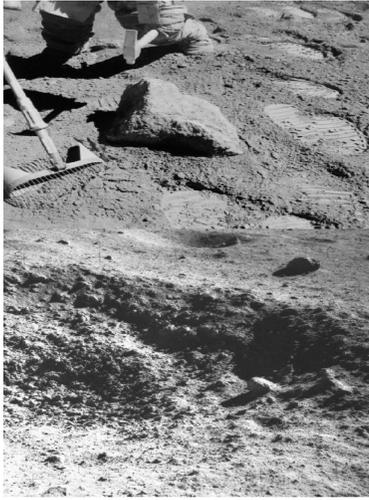


图3 月壤是月球表面的岩石长期遭受小天体频繁撞击而形成的

现在大家最关心的是火星上有没有水。通过火星探测,人类找到了很多证据,证明火星上曾经存在过水体,但是这些水现在到哪儿去了?什么时候有过水的活动?这些都还不知道,因为要把火星上的石头带到地球上进行分析研究,才能测出什么时候有过水的活动,然后再来推测那个时候火星上有没有生命。另外还发现,木星的卫星——木卫二、木卫三和土星的卫星——土卫六可能有地下海存在。因此要在太阳系内找到生命存在的痕迹大概只有火星和这几个卫星,太阳系的其他地方不太可能有生命存在。

(7)月球上没有生命,没有活动的有机体、化石或有机体固有的有机化合物。大量研究表明所有月球样品中没有发现生命存在的证据。说到太阳系内的生命,曾经有一块陨石引起了全世界的争论,这块陨石是1984年在南极找到的,是从火星上掉下来,陨石里有一些奇怪的小虫子形状的“化石”,美国科学家宣布说是细菌化石,从而推测火星上曾经发育过细菌,曾经存在过生命。这是36亿年前形成的石头,也就是说假如36亿年前火星上有生命,它的生命的水平是细菌。那时地球的生命水平也是细菌,也可以说那时地球上的细菌一直发展到现在生机勃勃的生物圈和人类。火星上为什么生命得不到繁衍?火星上生命起源的环境与演化过程是怎样的?是火星把生命带到了地球还是地球的生命带到了火星?或者地球和火星各自产生过生命?这些问题仍是未解之谜。

(8)月球和地球在成因上是相互联系的,它们都是由相同的物质“原料”(元素)以不同的比例“混合”形成的。虽然组成月球和地球的化学元素相同,但月球更富含难熔元素,强烈地亏损铁和挥发性元素。所有的月球

岩石都是通过高温的内生过程(岩浆或火山作用)形成的。月球岩石可粗略地分为三类:玄武岩、斜长岩和角砾岩。

迄今为止,在月球岩石中已发现100多种矿物,其中绝大多数矿物的成分和结构与地球的矿物相同,只有静海石等5种矿物在地球上未发现过。月球矿物普遍不含水,矿物中的变价元素多为低价元素,如Fe多为零价金属铁或二价亚铁,表明月球矿物是在缺水和还原的条件下形成的。

(9)月球有一个厚的月亮(60 km),一个相当均一的岩石圈(厚60~1 000 km)和一个部分液化的岩流圈(1 000~1 740 km深度),在岩流圈的底部可能存在一个小的铁核或硫化铁核,但其存在与否尚未得到证实。

(10)月球在总体形态上有轻微的不对称现象,这可能是地球重力影响的结果。月球背面的月亮较厚,而大部分火山熔岩填充的大型月海盆地和质量瘤多存在于月球正面。在月球的内部,质量也不是均匀分布的,大的质量密集区(“质量瘤”)位于许多大型月海盆地的表面之下。

(11)现在的月球是一个古老的、“僵死”的星体。月球的内部能量已近于衰竭,表面热流仅为 $2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,内部的地温梯度也很小,整个月球的月震释放的能量低于106 J/h,每年月震释放的能量仅相当于地震的一亿分之一。自31亿年以来,月球没有发生过显著的火山活动和构造运动。因此,月球的“地质时钟”停滞在31亿年之前,至今仍保留了其早期形成时的历史状况。

月球是在46亿年前形成的,与地球同龄,而且,所有太阳系的天体都是那个时候形成的。月球的内部能量已于31亿年前接近释放殆尽。地球的内部能量还要有45亿年才能释放完,那个时候将是什么景象?现在的月球给了我们一个示范,45亿年以后的地球就像现在的月球一样。当然,由于太阳的生命将更长,仍将源源不断地提供给地球以能量,地球的表面仍将是繁荣的,这跟地球内部的能源没有太大关系。

(12)根据对月球各类岩石的成分、结构与形成年龄的研究,月球演化历史的重大事件可归纳为以下几个阶段:

①月球大约形成于45.6亿年前;

②月球形成后曾发生过较大规模的岩浆洋事件,通过岩浆的熔融分离过程和内部物质调整,于41亿年前形成了月壳、月幔和月核;

③在40~39亿年前,月球曾遭受到小天体的剧烈撞击,形成广泛分布的月海盆地,称为雨海事件;

(下转第198页)

- wing flapping in small insect. *Acta Mechanica Sinica*, 2003, **19** (6): 508–516
- 16 Yu Y. L., Tong B. G. A flow control mechanism in wing flapping with stroke asymmetry during insect forward flight. *Acta Mechanica Sinica*, 2005, **21**(3): 218–227
- 17 余永亮, 童秉纲, 马晖扬. 昆虫拍翼方式的非正常流动物理再探讨. *力学学报*, 2005, **37**(3): 257–265
- 18 敬军, 李晟, 陆夕云, 尹协振. 鲫鱼 C 形起动的运动学特征分析. *实验力学*, 2004, **19**(3): 276282.
- 19 Jing J., Yin X. Z., Lu X. Y. Observation and hydrodynamic analysis on fast-start of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidra* co). *Progress in Natural Science*, 2005, **15**(1): 34–40
- 20 Jing J., Yin X. Z., Lu X. Y. The Hydrodynamic Analysis of C-start in crucian carp (*Carassius auratus*) *J. Biom., Eng.*, 2004, **1**(2): 102–107
- 21 胡文蓉. 鱼类单向机动运动二维流动特征的数值研究. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2004.
- 22 Hu W. R., Yu Y. L., Tong B. G., et al. A numerical and analytical study on a tail flapping model for fish fast C start. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, **20**(1): 16–23
- 23 王肇, 宋红军, 尹协振. 二维机翼非正常运动的涡流场显示—1 沉浮运动. *流体力学实验与测量*, 2004, **18**(2): 71–76.
- 24 王肇, 宋红军, 尹协振. 二维翼型非正常运动的涡流场显示—2 俯仰运动和沉浮/俯仰联合运动. *流体力学实验与测量*, 2004, **18**(3): 38–42
- 25 Lu X. Y., Yang J. M., Yin X. Z. Propulsive performance and vortex shedding of a foil in flapping flight. *Acta Mechani-*

ca, 2003, **165**: 189–206.

- 26 杨义红, 尹协振, 陆夕云. 二维波动板流动显示方法研究. *实验流体力学*, 2005 **19**(2)
- 27 Lu X. Y., Yin X. Z. Propulsive performance of fish like travelling wavy wall. *Acta Mechanica*, 2005, **175**: 197–215
- 28 Dong G. J., Lu X. Y. Numerical analysis on the propulsive performance and vortex shedding of fish-like traveling wavy plate. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 2005. (in press)

A Brief Review on Domestic Research Developments in Biofluidynamics of Animal Flying and Swimming

Tong Bing gang^① Sun Mao^② Yin Xie zhen^③

① Professor, CAS Member, Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; ② Professor, Cheung Kong Scholars Programme, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083; ③ Professor, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Key words animal flying and swimming, external biofluidynamics, experimental observation, numerical studies, theoretical modeling

(上接第 190 页)

④ 在 39~31.5 亿年前, 月球发生过多次剧烈的玄武岩喷发的月海泛滥事件, 大量玄武岩填充了月海, 厚度达 0.5~2.5 km;

⑤ 31.5 亿年以来, 月球内部的能源逐渐枯竭, 再也没有发生大规模的岩浆火山活动与月震, 但小天体的撞击仍然不断发生, 形成密密麻麻的撞击坑, 使月球表面斑驳陆离、千疮百孔。

(13) 月球起源的理论主要有 4 种假说: ①捕获说; ②共振潮汐分裂说; ③双星说; ④大碰撞分裂说。近年来, “大碰撞分裂说”获得了大量的证据并得到了大多数学者的支持。这一学说认为如今的月球是一个火星大小的天体撞击原始地球, 从原始地球中分离出来的一部分。因此, 人们常说月球是地球的女儿。

总之, 现在的月球是一个古老的、“僵死”的星体。月球的内部能量已近于衰竭, 月震和表面热流均极小。月球的“地质时钟”停滞在 31 亿年之前, 这对研究地球早期演化历史具有重要意义。比较而言, 火星是一个老态龙钟接近“死亡”的天体, 而地球仍然是生机勃勃的、处于壮年期的天体。

2.2 月球探测宁静期(1976 年—1994 年)

自 1976 年以来, 持续约 18 年没有进行过任何成功

的月球探测活动, 其原因可能是: ①随着冷战形势的缓和, 随后前苏联解体, 空间霸权的争夺有所缓解; ②需要总结月球探测活动耗资大、效率低、探测水平不高的经验与教训, 提出新的探测思路 and 战略; ③以月球探测获得的技术为基础, 将月球探测技术向各领域转化、推广和应用, 完善航天技术系统, 研制新的空间探测技术, 如往返运输系统、高效探测仪器等, 为进一步开发利用地外资源进行科学和技术准备; ④需要较长时间进行探测资料的消化、分析与综合, 将月球科学研究提高到更高层次理性认识的阶段。(待续)

(2005 年 6 月 16 日收到)

Review of Lunar Exploration and Introduction of Chinese Lunar Exploration Project

Ouyang Zi yuan

Institute of Geochemistry, The National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012

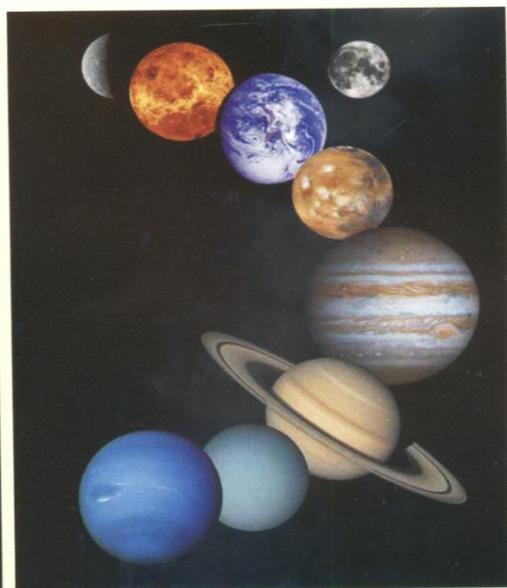
Key words lunar exploration, Chang'E 1 lunar orbiter, Chinese lunar exploration project

人类的航天活动

扩展生存与发展的空间是人类社会的经济、科技和文明发展的需要，也是对人类无限求索精神的激励



▲ 月球是人类飞出地球，开展深空探测的首选目标



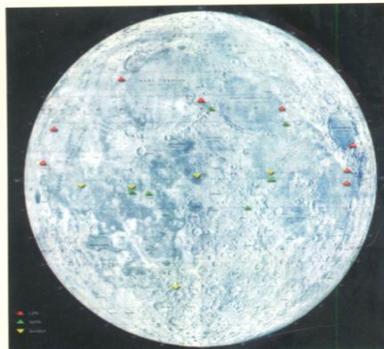
▲ 深空探测:以太阳系空间为主



▲ 本世纪的深空探测:以月球与火星为主线的太阳系探测



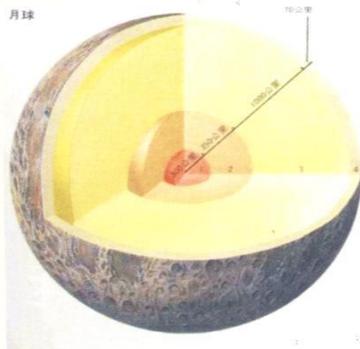
▲ 小行星与彗星的探测: (1) 组成太阳系的原始物质,探索太阳系的起源与演化; (2) 研究防止小天体撞击地球的方案; (3) 开发利用前景



▲ 美国(绿色和黄色三角)和前苏联(红色三角)在月球表面软着陆、月球车探测和载人登月位置



▲ 美国宇航员在月球表面考察



▲ 月球的内部结构

参见本期“月球探测的进展与我国的探月行动”一文