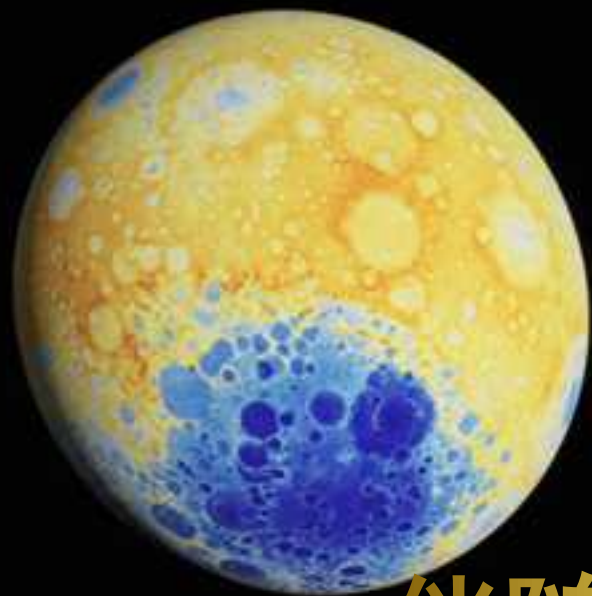




伴随嫦娥工程的月球和行星科学进展

中国科学院国家天文台

报 告 人：李春来

二〇二二年十月



地球科学是一切研究地球的科学，各学科都会以数学、物理、化学、生物、地理、地质、气象等各个侧面来研究地球，因此地球科学不是一个纯粹科学，而是一个应用科学；

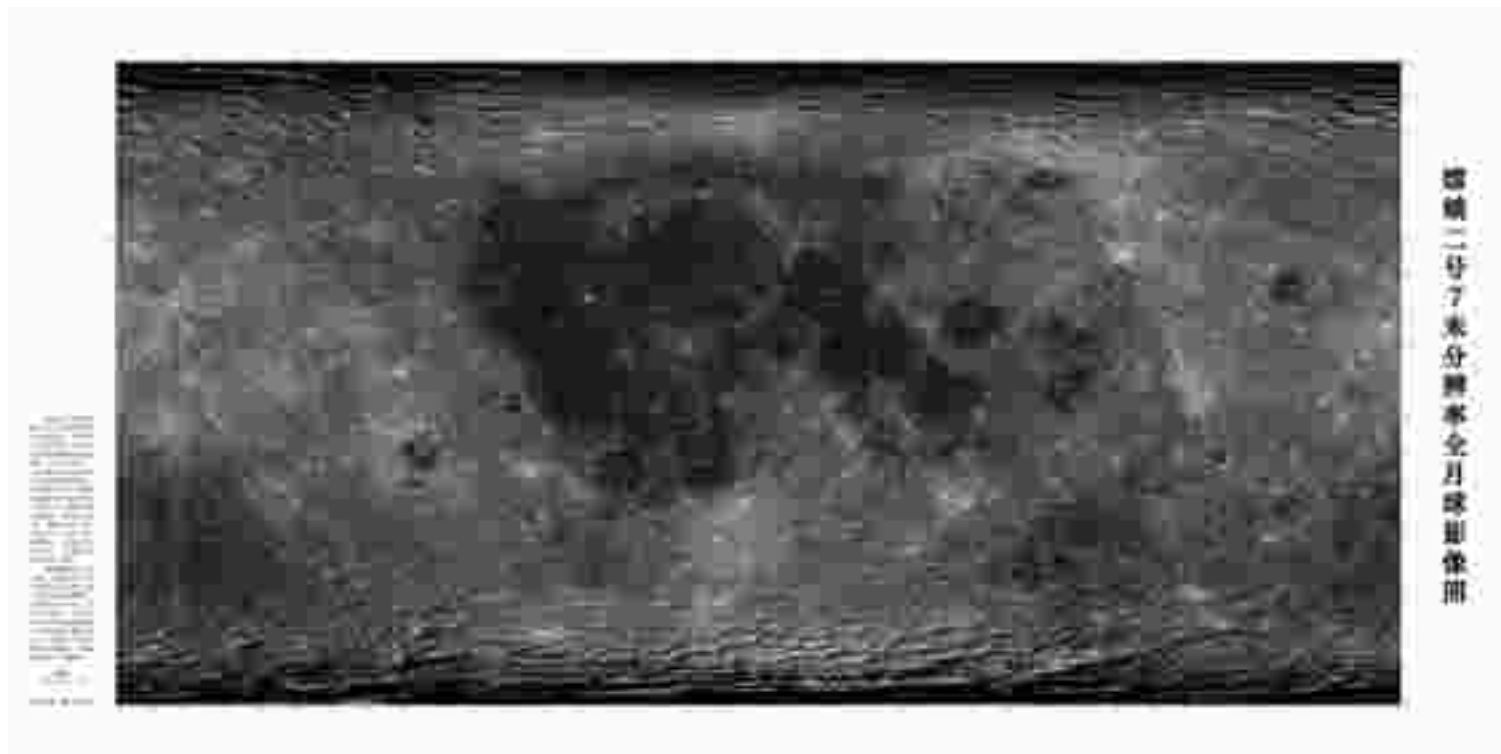
地球科学起源于人类最先接触到的土、石，从点到面到体，从局部到区域到全球，以及扩展到地球以外的空间和天体，成为行星科学（天文学）。在这个意义上，地球科学可视作行星科学的专门分支。

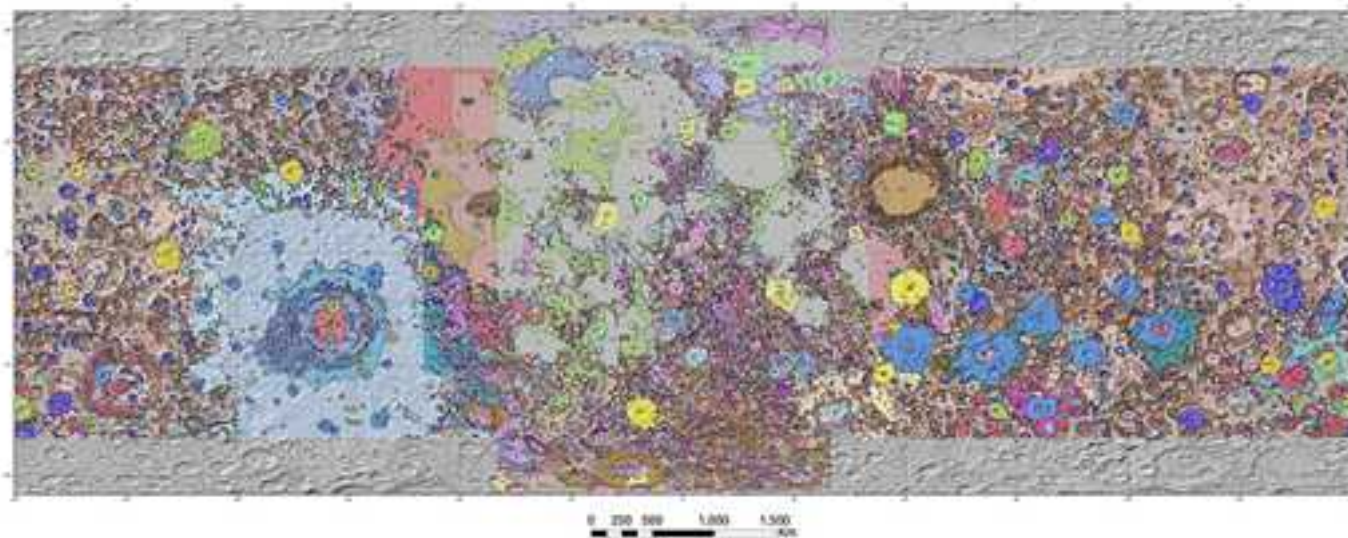
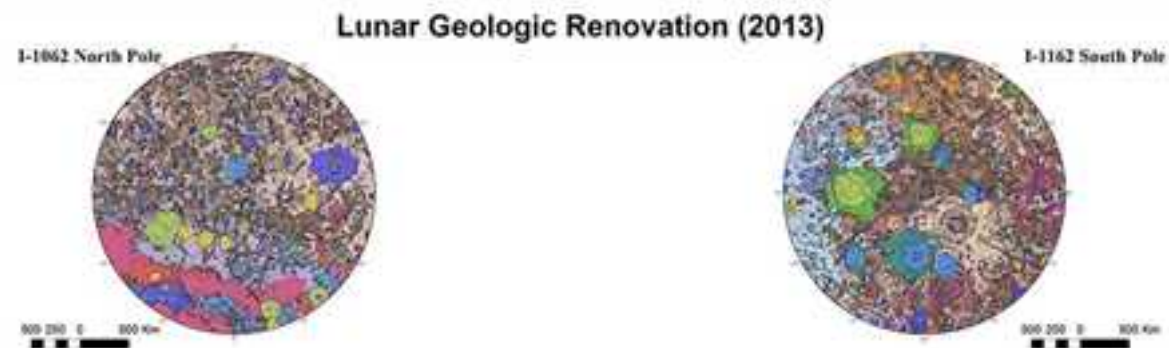




行星科学是地球科学的延伸和扩展

行星科学仍然使用地球科学将今论古的哲学方法，将其由我及他、由近及远

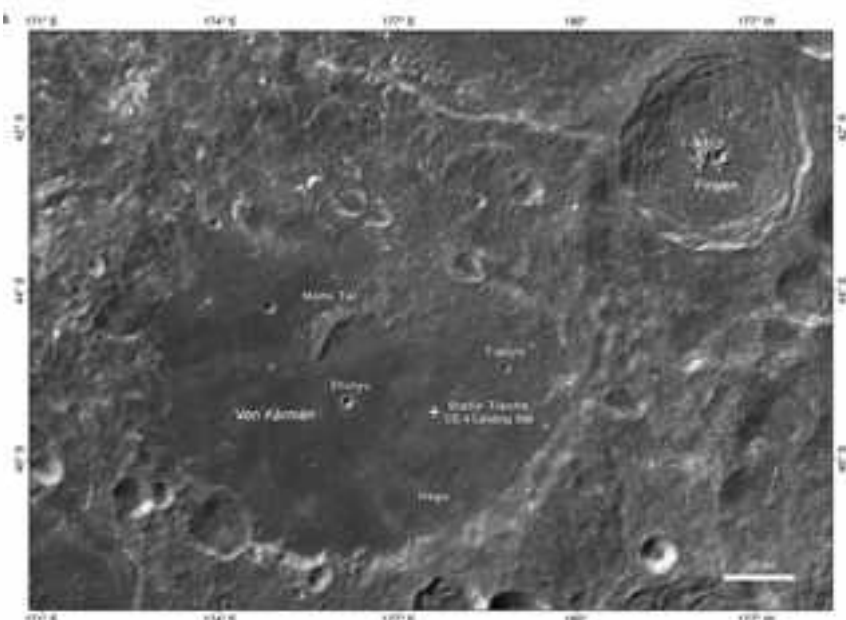
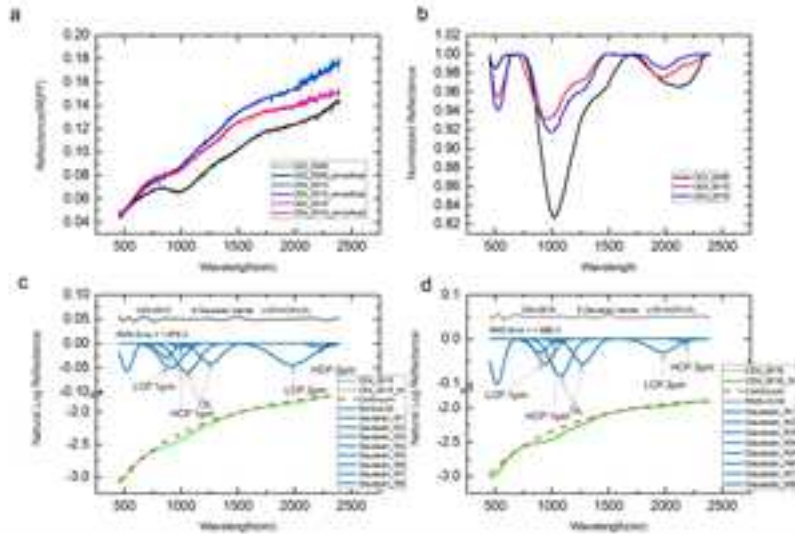




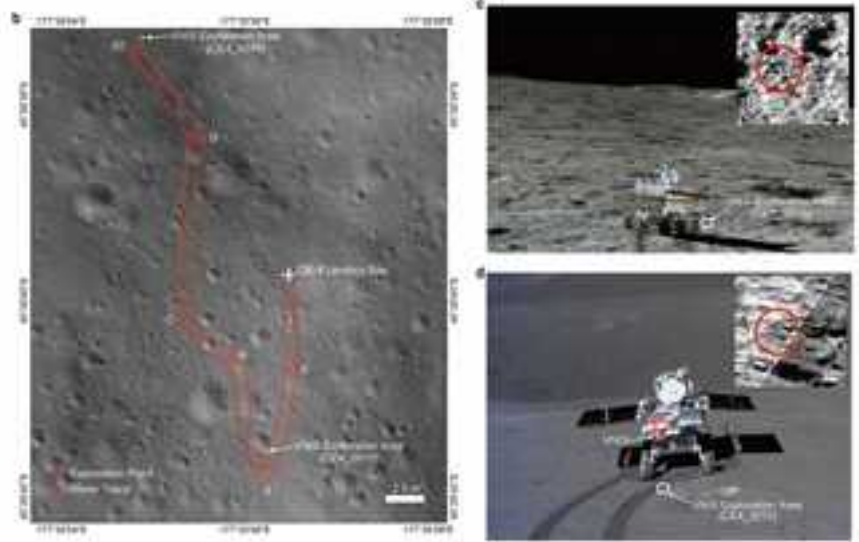
岩石-地层单元	时间-地层单元	地质年代单元
坑物质 第谷 阿里斯塔克 开普勒 德特尼斯	哥白尼系	哥白尼纪
哥白尼 追莫芬塔斯 亨利斯勒 尤勒 提莫恰里斯 爱拉托逊 兰伯特 克里格	爱拉托逊系	爱拉托逊纪
赫韦吕斯建造 (东海盆地)	上雨海统	晚雨海世
火山物质	下雨海统	早雨海世
弗拉摩洛建造 (雨海盆地)	酒海系	酒海纪
火山物质?	盆地和坑物质	
詹生建造 (酒海盆地)	前酒海系	前酒海纪
火山物质?	盆地和坑物质	
早期月壳岩石		

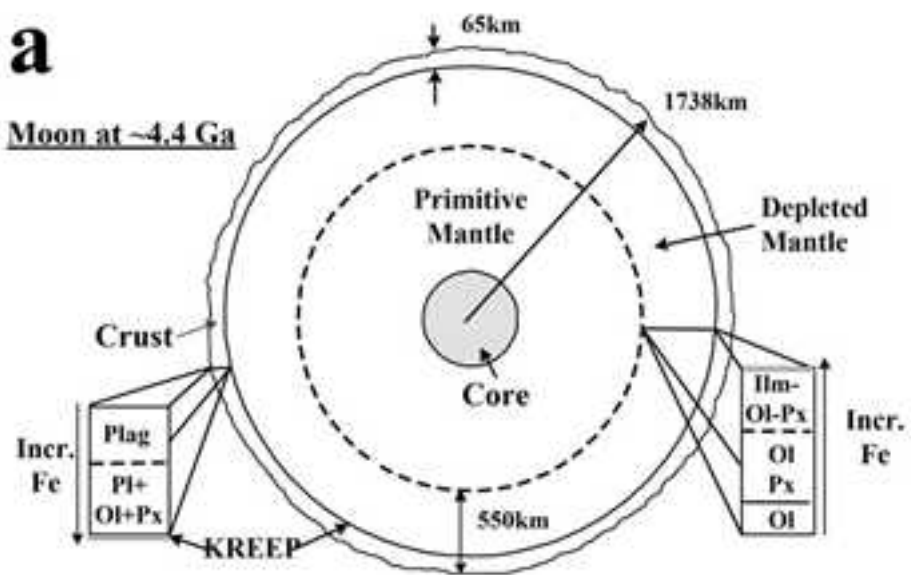
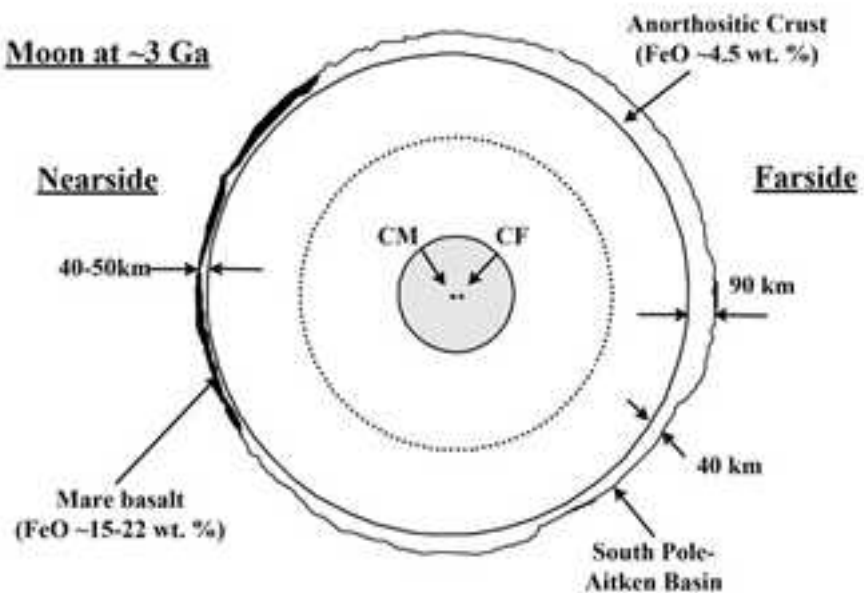
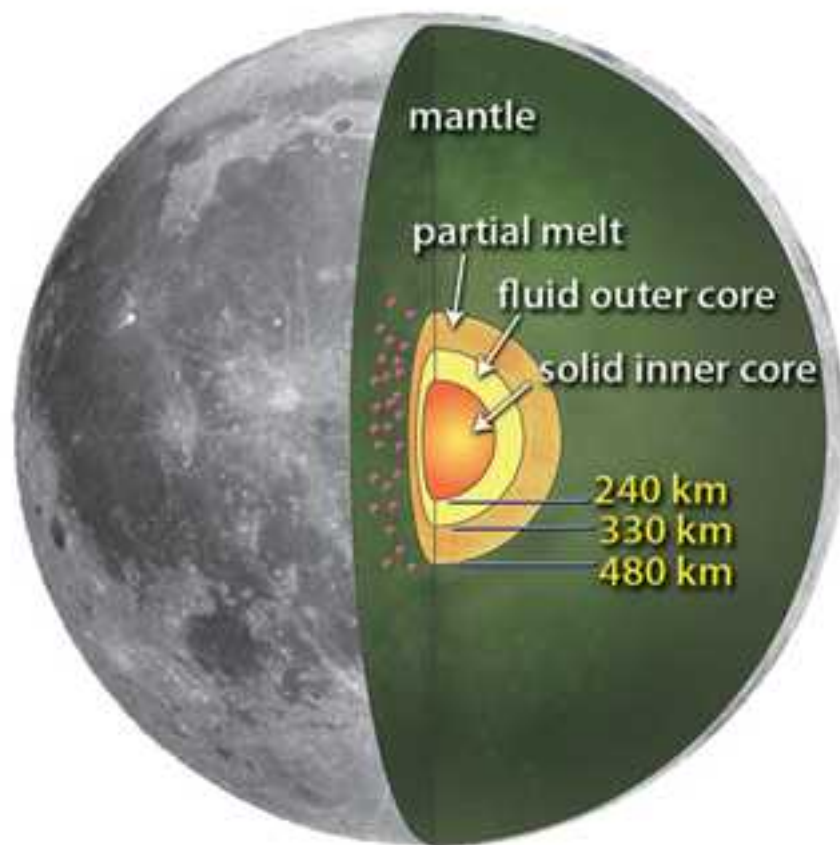


粗玄岩薄片包含静海石，这种矿物曾被认为是月球独有的。但是现在人们认为它在地球上很常见



月球的独有矿物：
 静海石；
 铁三斜辉石；
 低铁假板钛矿；
 纯钼Mo微粒（约0.6um）；
 硫化银AgS微粒(1~3um)；
 铁锡Te-Sn固溶体
 (0.2~0.7um)。



aMoon at ~4.4 GaMoon at ~3 Ga**b**



行星科学起始于地球科学，是地球科学的延伸。

但行星探测又展示了在地球上没有发现的**许多不同和多样性**，以及行星演化的**历史记录**，对我们**理解行星（和地球）是如何形成的**，各种物理和化学过程的复杂相互作用如何创造了行星环境的多样性，甚至能导致生命起源和进化的条件，具有实质性的贡献。

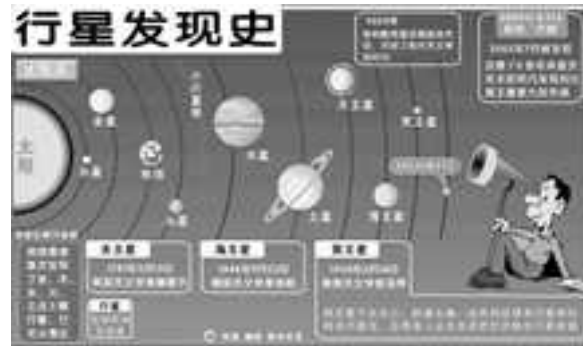
至于行星探测的发展会带来哪些具体的应用,目前还难以估计。正像二十年前,很少有人想到人造卫星的发展，会带来目前这么广泛的应用一样。

地球科学是行星科学的起始和出发点，但从另一个意义上讲，地球科学又是行星科学的归宿。

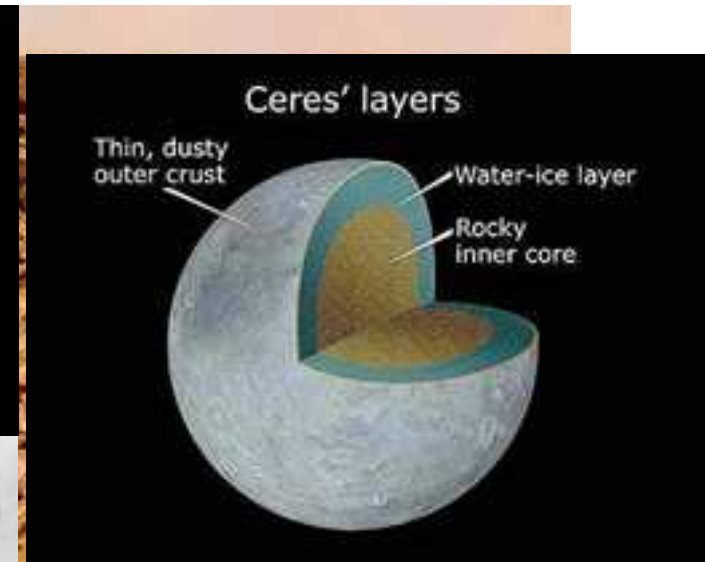
地球只是太阳系行星的一员，地球的演化历史，别的行星也会在一定程度上地经历过和记录着，不同演化阶段的行星，可能正是地球演化历史的“化石”。因此行星科学的知识可以反过来促进完善地球科学的理论和预示地球演化的可能方向。

月球与行星科学的发展，很大程度上依赖于航天技术的发展，依赖于通过探测器获得的第一手科学探测数据，甚至行星表面的实地探测、系统采样和样品研究。

月球和行星科学，从地基观测阶段，进入空间探测阶段，实现阶段性的发展



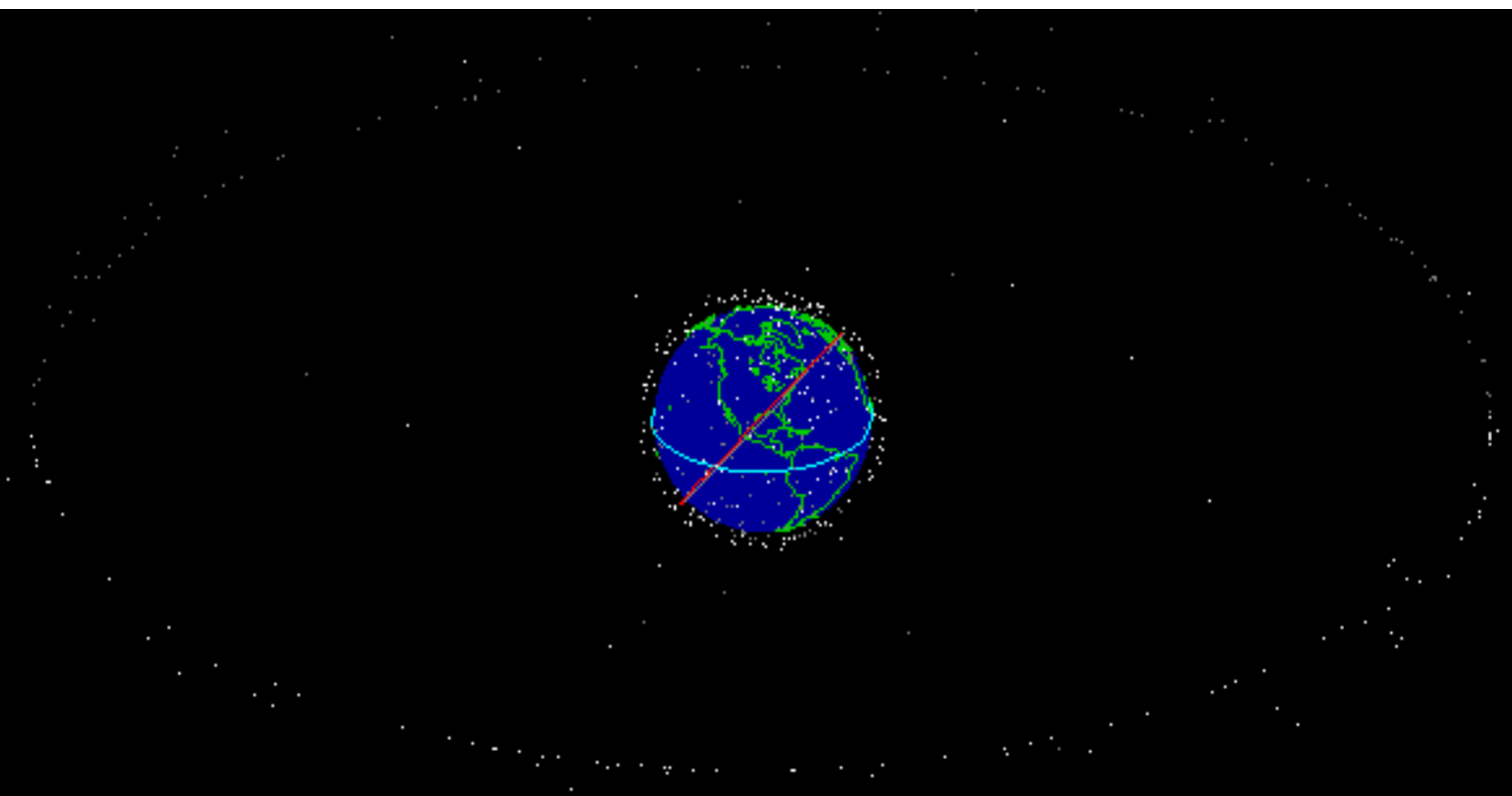
地基天文观测——点 空间遥感探测——面（现状）行星着陆和采样探测——体（演化历史）



深空探测——是不以地球引力为主引力场的空间探测活动。

以人造探测器到达该空间为准，相应对地观测（Earth Observation），探测器进入了以太阳系其他天体为主要引力影响的空间，飞行器不再直接围绕地球运动的区域。

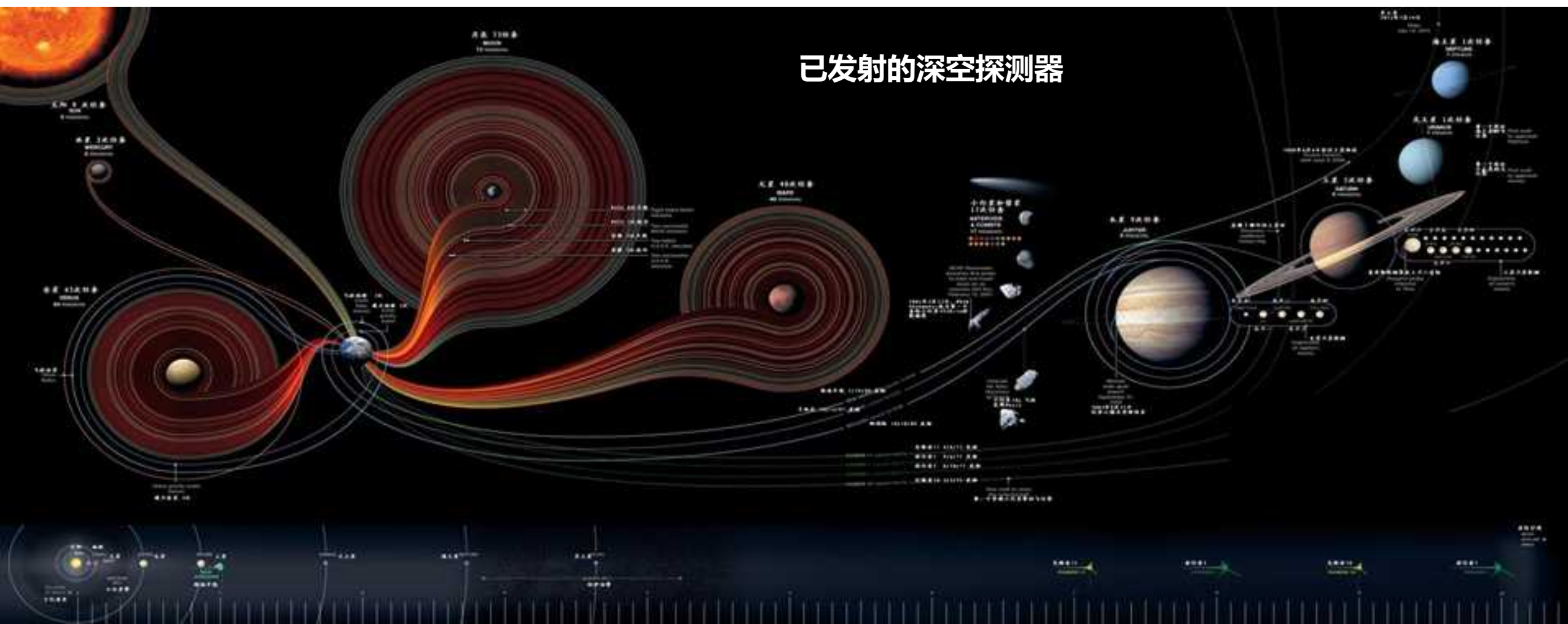
一定意义上，飞出地球（不环绕地球）的探测活动都可称之为深空探测；这些活动中除了针对太阳的探测器以外，都是行星和行星际探测，也可狭义地称之为深空探测。

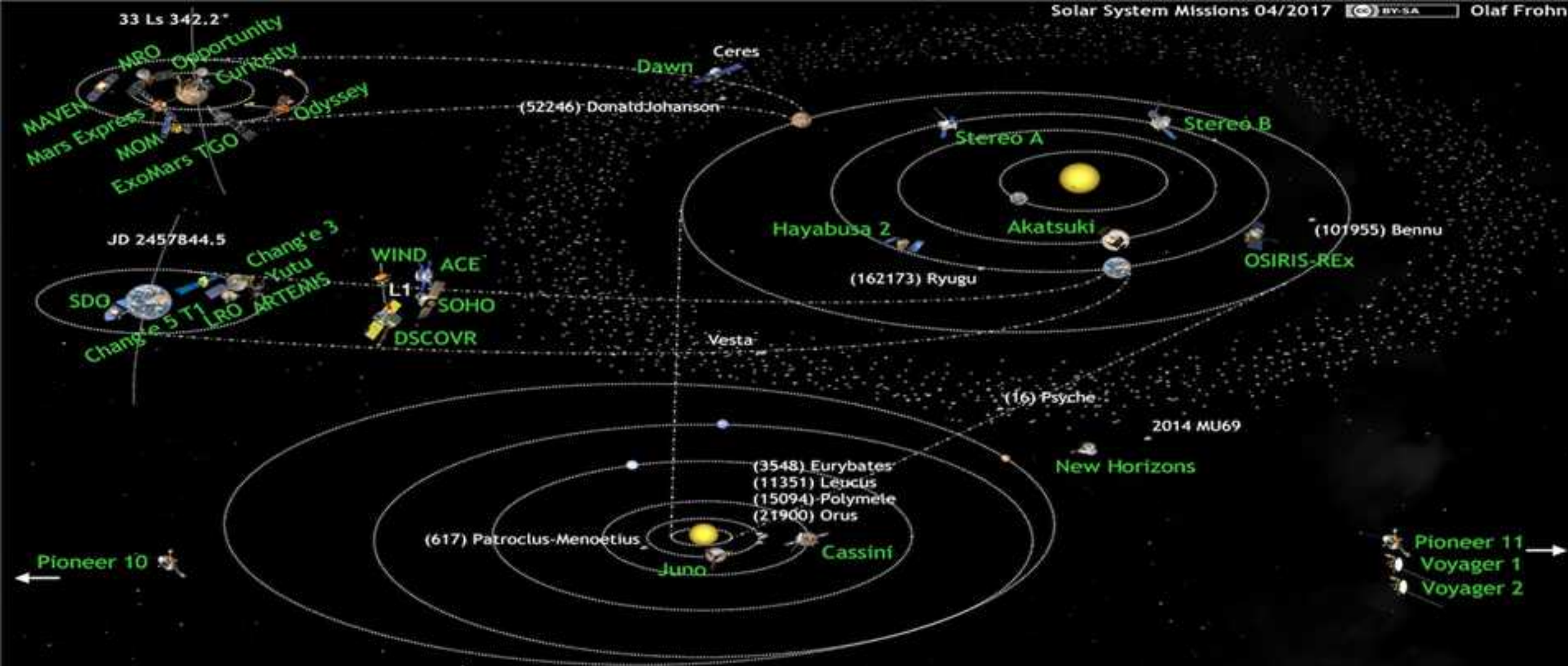


深空探测概况

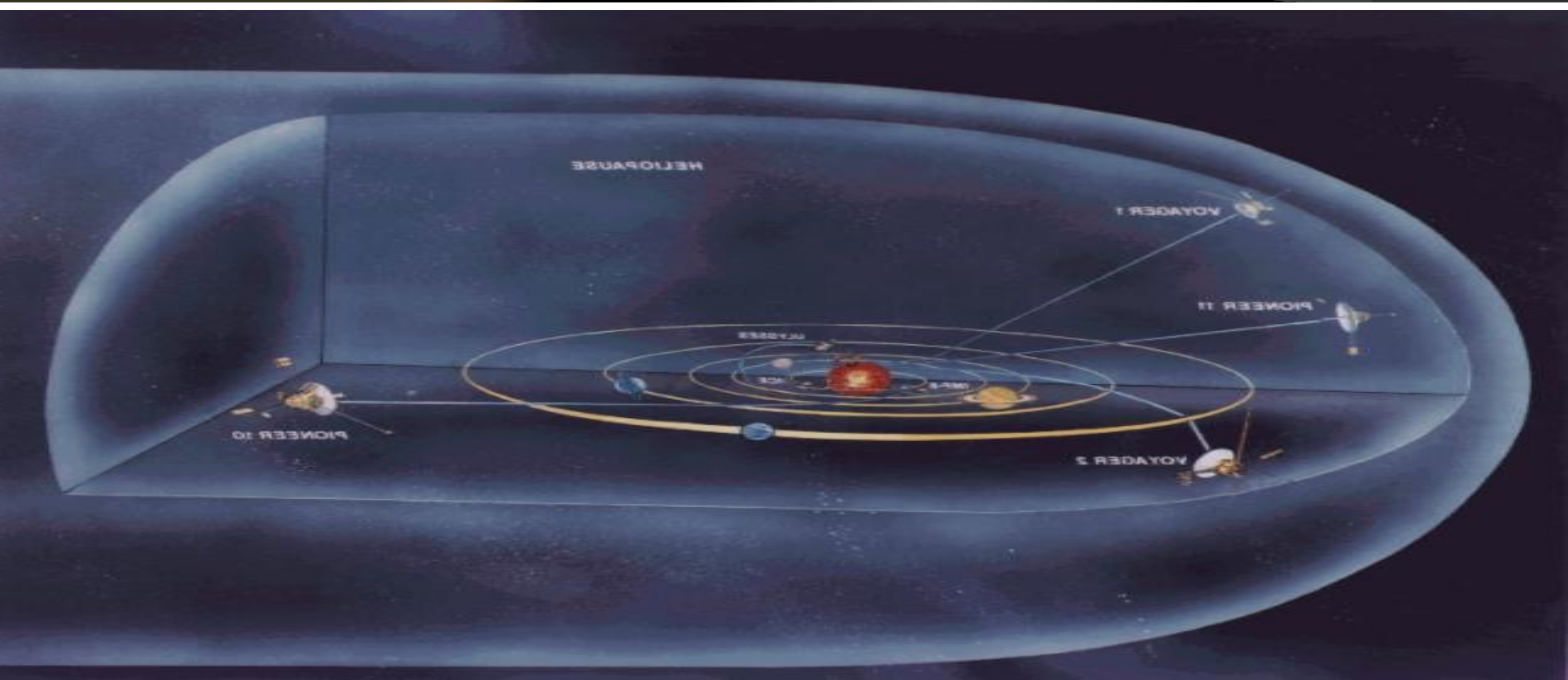
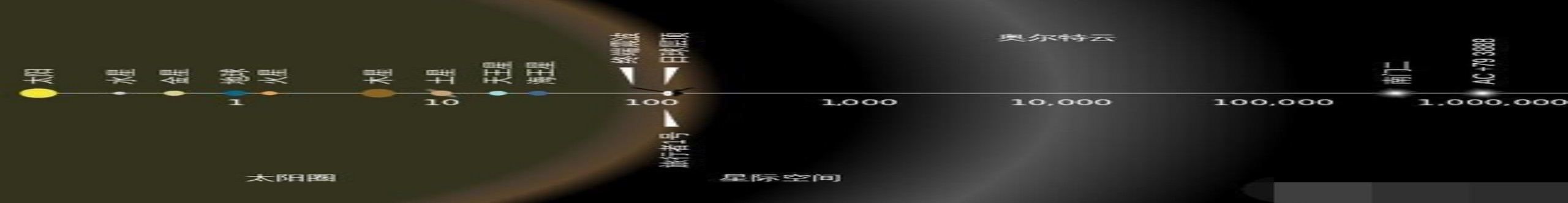


60年来，人类对月球、各大行星及矮行星、行星卫星、小行星、彗星等天体进行了全方位、多手段的科学探测，人类的深空探测活动带来了许多意想不到的新发现和新成果。





Upcoming Events				
2017				
Apr: Cassini Grand Finale Orbits	May: MOM-2 Launch to Mars	Chang'e 4 LRS Launch/OI Moon	Chang'e 4 Launch/SL Moon	2021+
Sep: Cassini EOM	May: InSIGHT Launch to Mars	KPLO Launch/OI Moon	Luna 25 Lander Launch	Mar: OSIRIS-REx Dep Benu
Sep: OSIRIS-REx FB Earth	May: MarCO Launch to Mars	Orion EM-1 Launch/FB Moon	2020	Juno EOM
Nov/Dec: Chang'e 5 Launch/SL Moon	Sep: OSIRIS-REx App Benu	+10 EM-1 Cubesats Launch/OI/FB	2020 Mars Rover Launch	ExoMars Rover EDL Mars
Dec: GLXP Last Launch Opp. Moon	Oct: Bepi-Colombo Launch to Merc.	Moon/Heliocentric Orbit	Chang'e 6 Launch/SL Moon	Lucy Launch to Jupiter-Trojans
Lightsail 2 Launch	Nov: InSIGHT EDL Mars	Solar Probe Plus Launch	ExoMars Rover Launch	Luna 27 Lander Launch
Voyager 2 Trans. Interstellar Space	Chandrayaan 2 Launch/SL Moon	Solar Orbiter Launch	Hayabusa 2 EDL Earth	[Chinese Asteroid FB] Launch (2022)
FB: Flyby; OI: Orbit Insertion; App: Approach; Dep: Departure; Imp: Impact	Hayabusa 2 App/SL Ryugu	Oct: OSIRIS-REx Sample Acq. Benu	Luna 26 Orbiter Launch	Europa Clipper Launch to Jup. (2022)
EDL: Entry, Descent and Landing; SL: Soft Landing; EOM: End of Mission		New Horizons FB 2014 MU69	Mars Hope Launch to Mars	JUICE Launch to Jupiter (2022)
		Hayabusa 2 Sample acq. Ryugu	MGRSO Launch to Mars	EM-2 Launch to Cislunar Space (2023)
			Red Dragon Launch to Mars	Psyche Launch to Psyche (2023)





深空探测活动极大推动了人类科技水平的持续发展。

人类通过对地外天体的近距离遥感探测、现场就位探测和真实样品的实验室分析，使得人类对宇宙特别是对太阳系的认知也取得长足的进步，**获得许多重大的科学发现：**

- 观察和研究它的现状。包括形貌特征、物质成分、结构、空间环境等，回答 “它是什么？” 的问题；
- 研究它的变化。回答 “它从哪里来？将向哪儿去？” 的问题，探索太阳系乃至整个宇宙的起源、发展和演化；
- 将它与我们生活的地球进行比较，回答 “它与我们有什么关系？” 的问题。

但是，人类对宇宙的认知和了解仍很肤浅！



我国深空探测发展战略

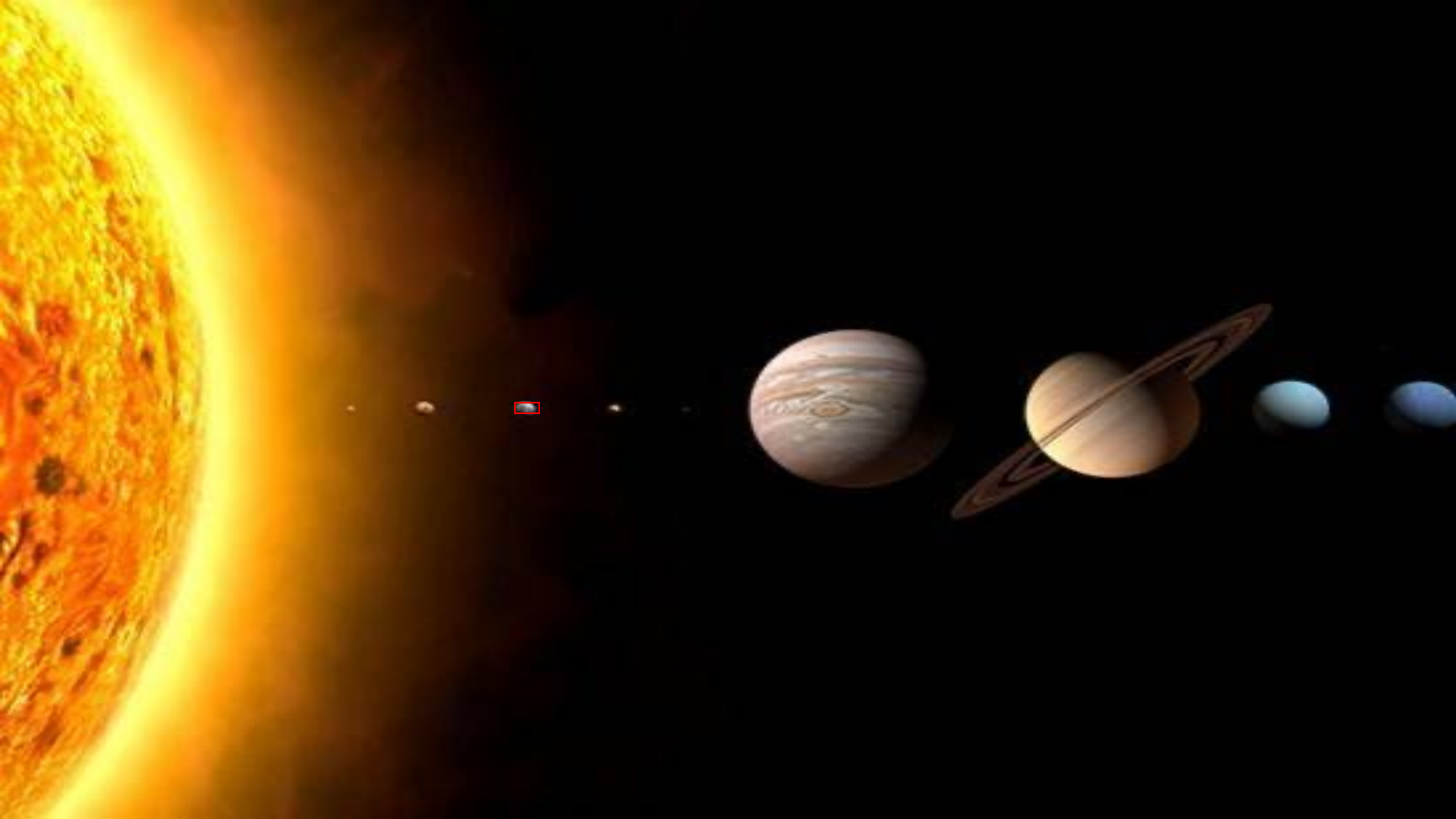
科学目标上选择重点、热点和亮点，技术上高起点，通过有限的探测活动，覆盖太阳系的主要天体类型、掌握各种探测手段,到达巨行星以外的深远空间：

- 月球是深空探测的起点
- 火星是深空探测的重点
- 小行星是深空探测的热点
- 木星系是深空探测的亮点



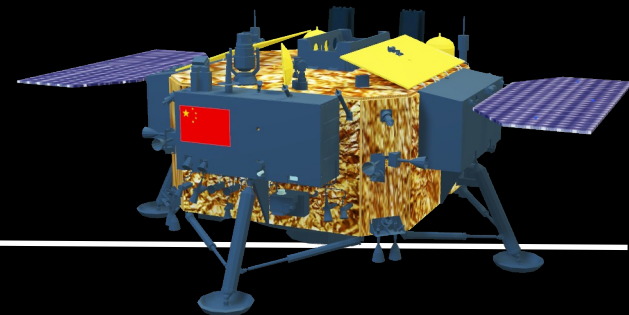
月球和行星探测的目的可归结为**三点**：

- 了解太阳系的物理化学变化的历史,探索生命的起源。
- 了解太阳系的起源、演变及现状;
- 通过太阳系内各主要行星的比较研究,进一步认识地球和人的周围环境 ;

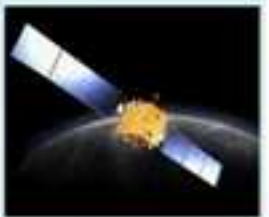
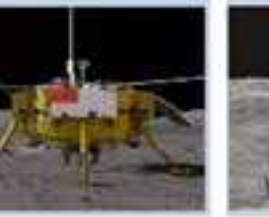




我国月球探测任务规划

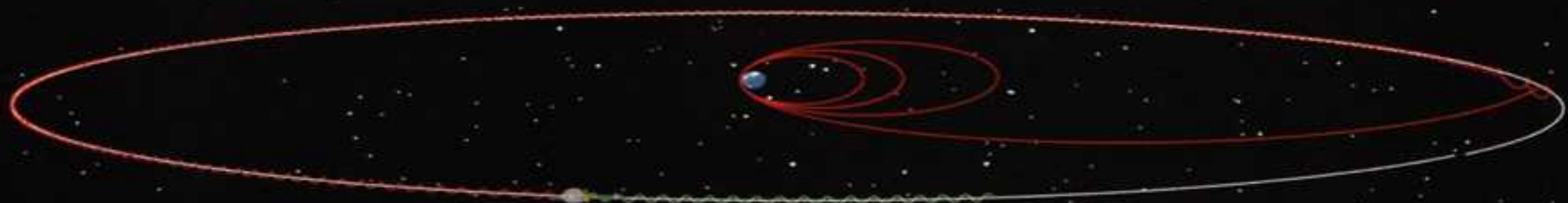
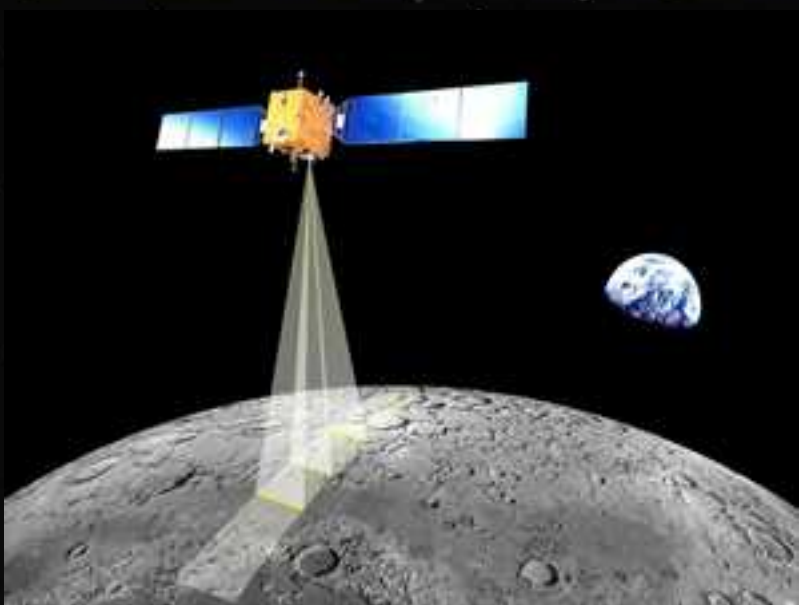


Road Map of China's Lunar and Deep Space Exploration Program

CE-1	CE-2	CE-3	CE-5T	CE-4	CE-5	CE-6	CE-7	CE-8
2007.10	2010.10	2013.12	2014.10	2018.12	2019	TBD	TBD	TBD
Orbital	Orbital	Lander/rover	Relay/lander rover	Relay/lander rover	Sampling return	Sampling return	Lander/station	Lander/station
Location??	Location??	Mare Imbrium		Crater Von Kármán	Oceanus Procellarum	South Pole	South Pole Comprehensive exploration	Lunar surface Key technology test
Short key point of mission	Short key point of mission	Short key point of mission	Short key point of mission	Short key point of mission	Short key point of mission	Short key point of mission	Short key point of mission	Short key point of mission
								

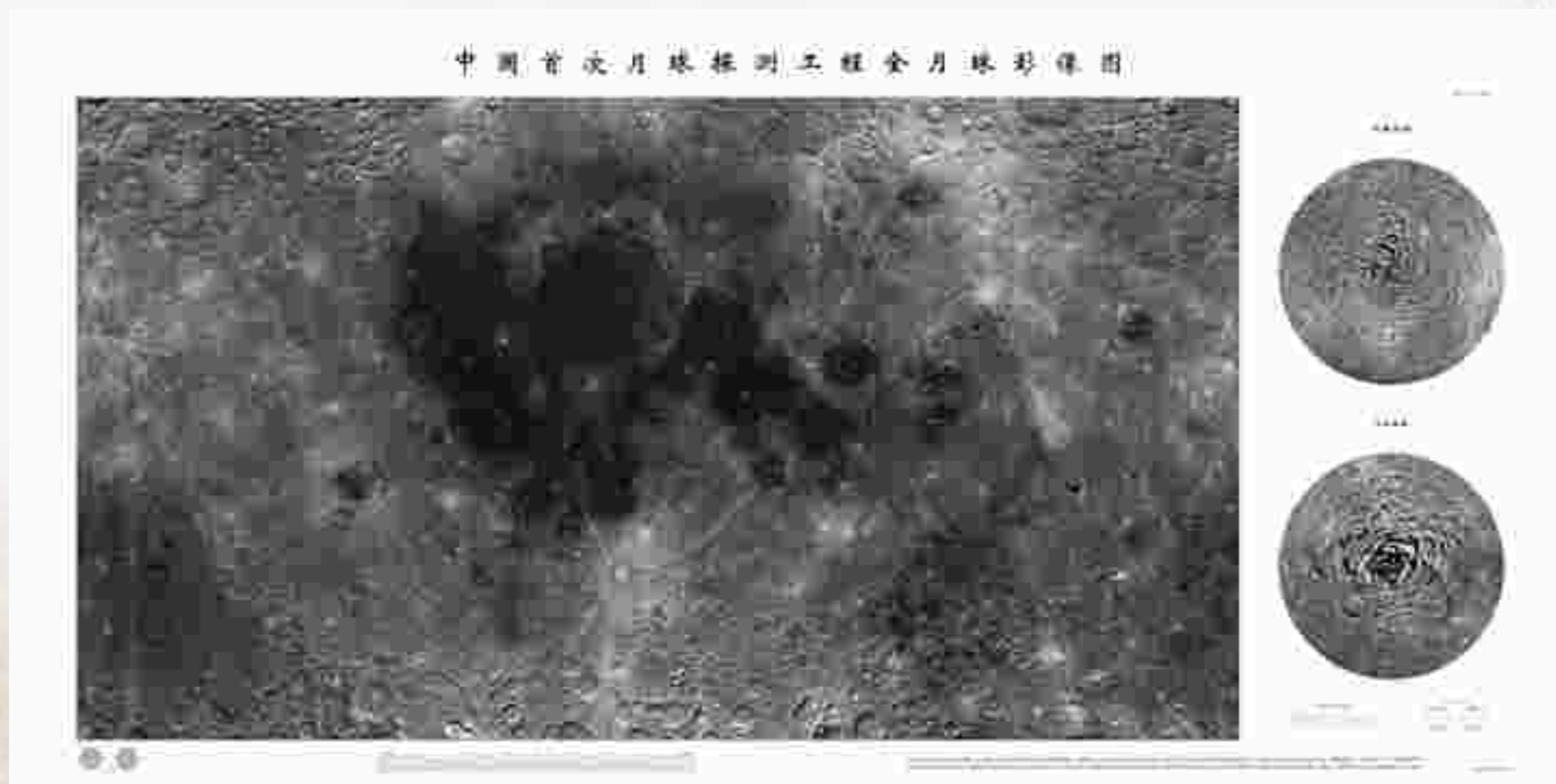
Flown missions 2004-2020

Missions in development 2020-2030



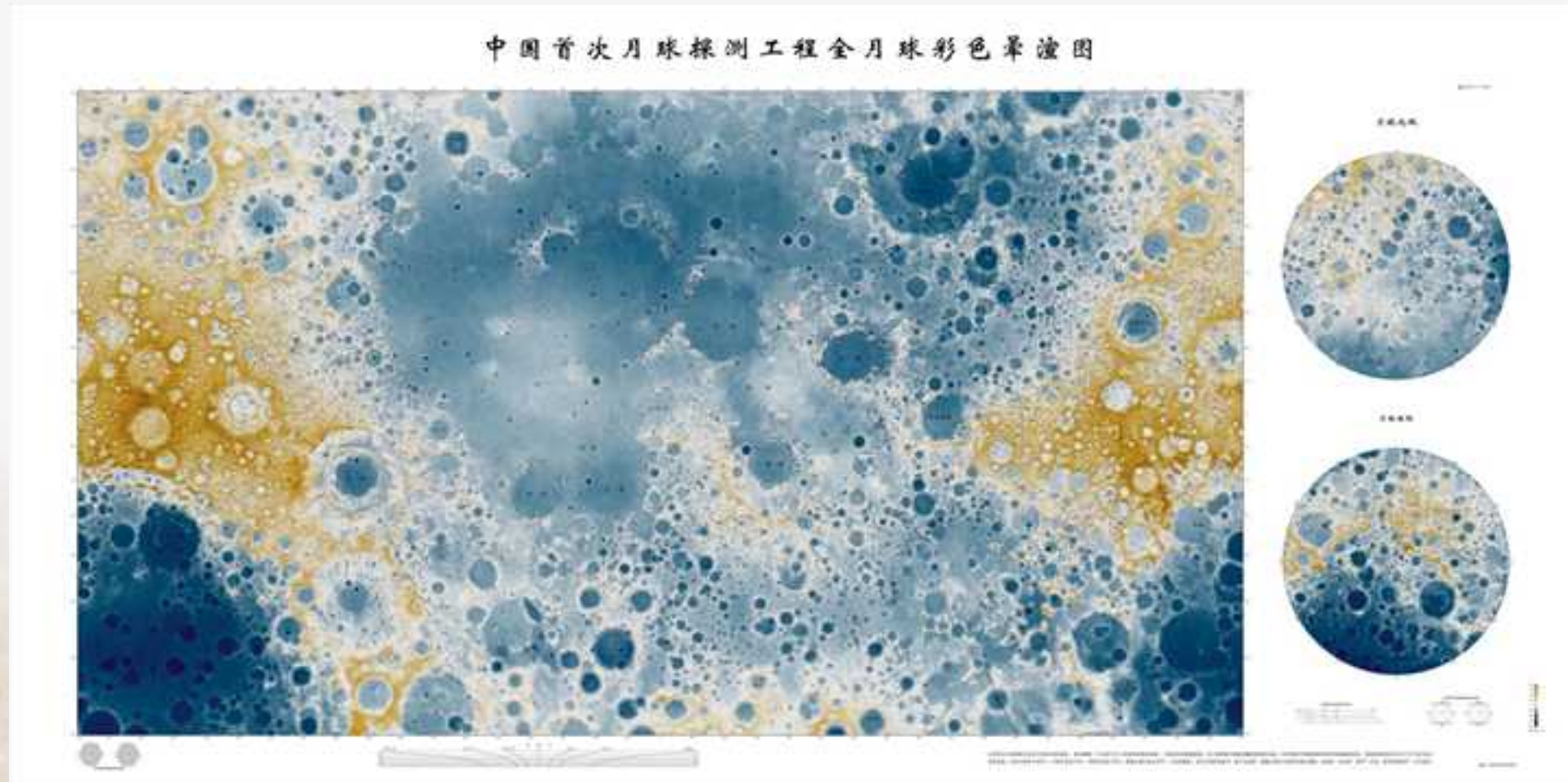
嫦娥一号任务

(1) 精度最高、质量最好的全月球影像图和数据



相对定位精度优于240米，绝对定位精度好于2005联合控制网（ULCN2005）和克莱门汀基础地图（2.0版），平面定位精度约为160 m 到1.8km。

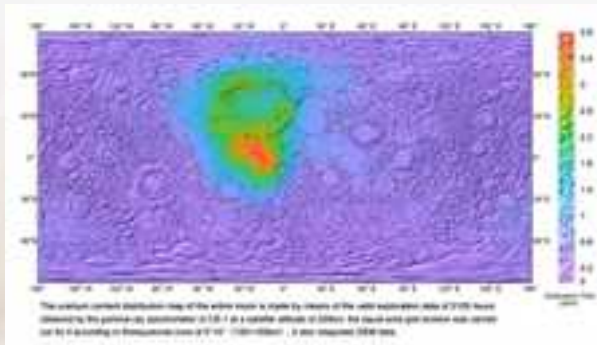
(2) 三线阵CCD解析最高分辨率DEM三维地形数据



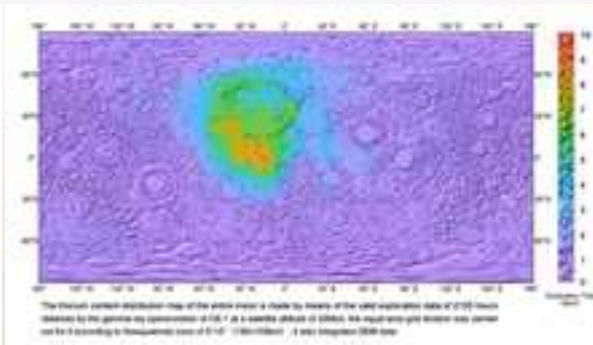
(3) 月表元素含量数据和分布图

伽马射线谱仪获得铀、钍、钾的全月球含量分布图

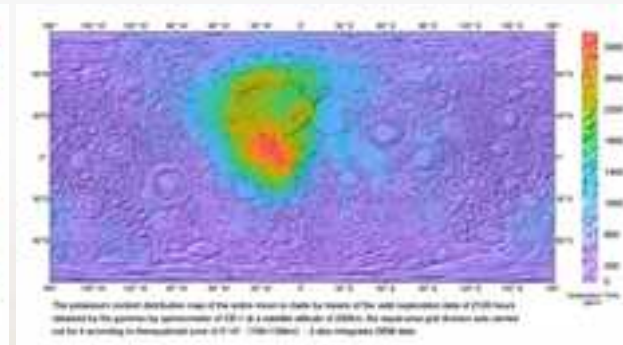
- 嫦娥一号卫星伽马射线谱仪共获取了1103轨有效探测数据，累计时间约2120.8小时。
- U、Th、K等3种元素能够解译出全月球分布和含量，Mg、Al、Si、Fe、Ti等元素只能解译出区域含量与分布数据（结合X射线谱仪的分析结果）。



U元素全月含量分布图

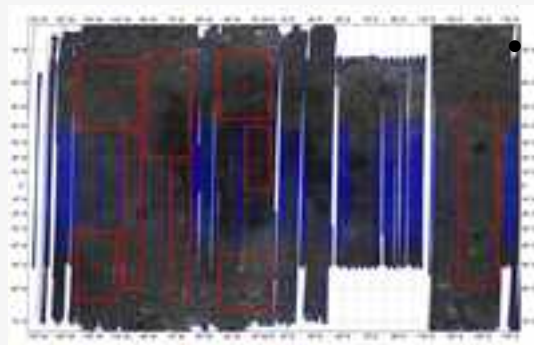


Th元素全月含量分布图



K元素全月含量分布图

(4) 月表物质多光谱数据



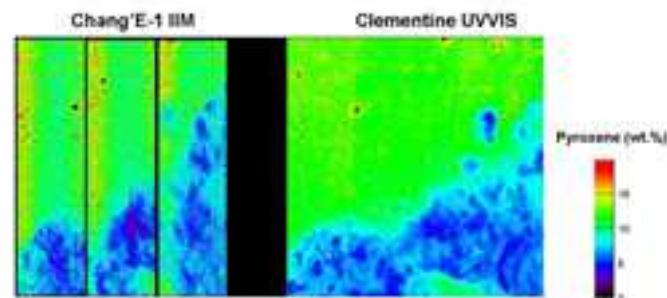
覆盖率：嫦娥一号干涉成像光谱仪共获得了706轨有效探测数据，覆盖了月球南北纬70°以内84%的月

表区域（相当于全月球的79%）。

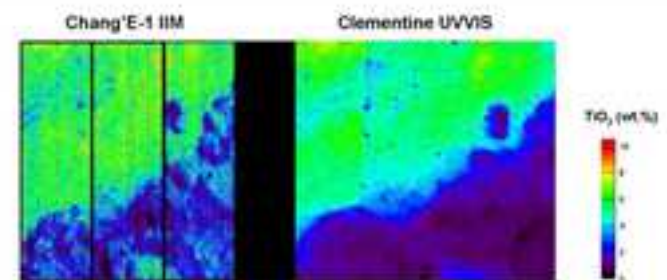
空间分辨率：200m；

光谱：480~960nm，共有32个谱段，光谱分辨率为7.6~29nm。**嫦娥一号成像光谱数据的谱段，远比Clementine UVVIS光谱仪（5个谱段）多，且光谱分辨率高。**

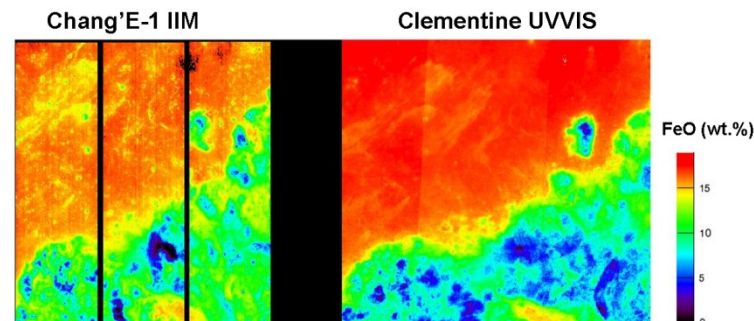
进一步的工作将利用光谱数据解译月表矿物和元素的含量分布。



月球危海地区辉石分布图



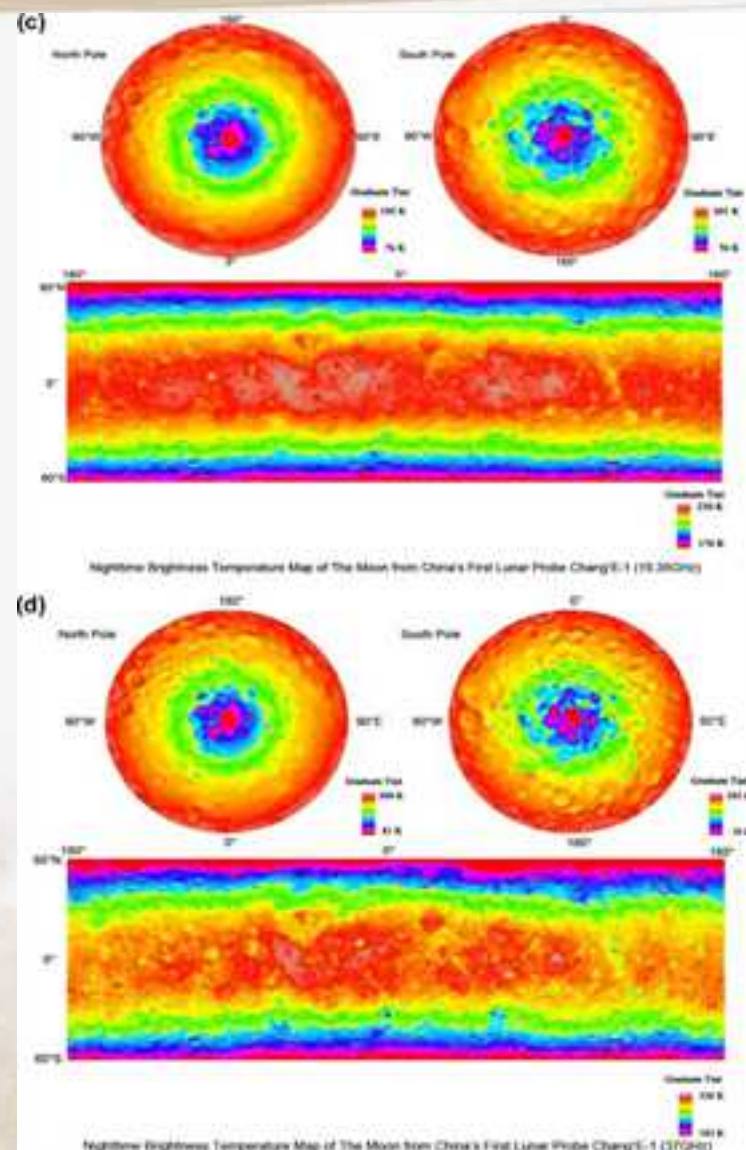
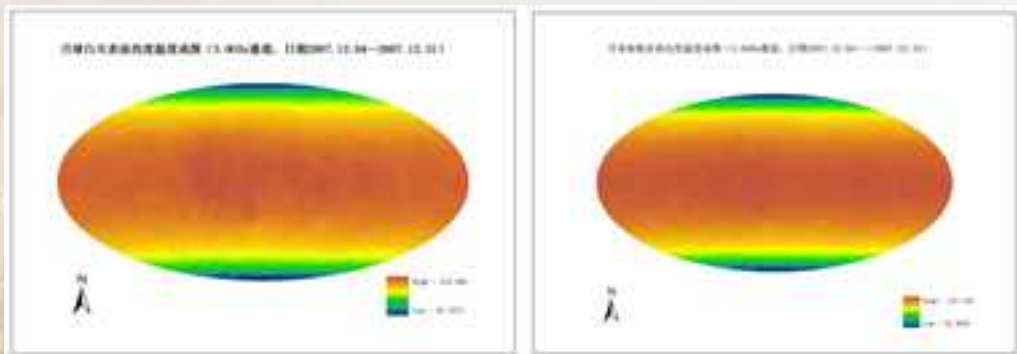
月球危海地区TiO₂分布图



月球危海地区FeO分布图

(5) 全月球4频段月表微波辐射亮温数据

- 嫦娥一号微波辐射计共获取了1690轨探测数据，数据累积时间约2642小时，数据多次（10次）覆盖了全月球表面。
- 国际上**首次采用被动微波遥感技术测量全月球微波辐射信息**，进而探测月壤特性，反演月壤厚度。
- 国际上**首次获得4个波段（3.0GHz、7.8GHz、19.35GHz和37.0GHz）的全月球微波辐射亮温数据**。
- 国际上**首次获得黑夜和月球背面的微波数据**，在此基础上将进一步反演月壤厚度，评估氦-3资源。



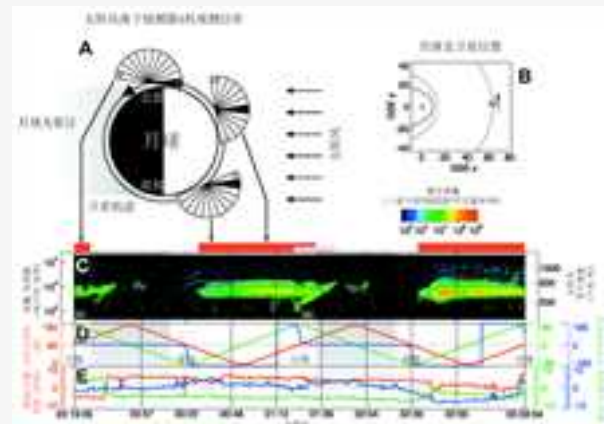
(6) 近月空间环境探测与发现

获取独特的近月空间高能粒子和太阳风离子数据：

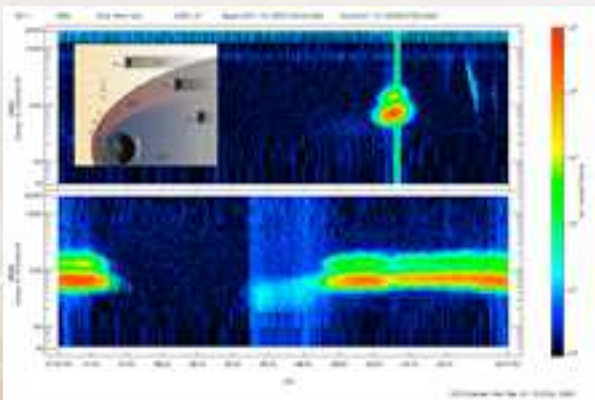
- 高能粒子探测器共获取了1846轨有效探测数据，累积时间为2868.5小时；
- 太阳风离子探测器获取了1815轨有效探测数据，累积时间为2852.3小时，其中约60%的轨数处于太阳风中。

发现日夜交界面质子的加速现象：

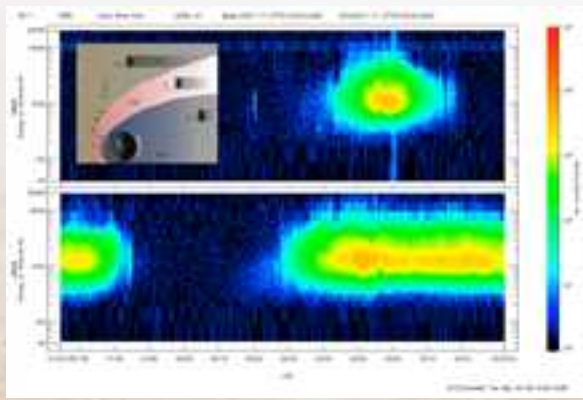
- 在卫星运行至两极日夜交界面附近，从日侧向夜侧运动时，常常能探测到一股速度逐渐增加的粒子流。



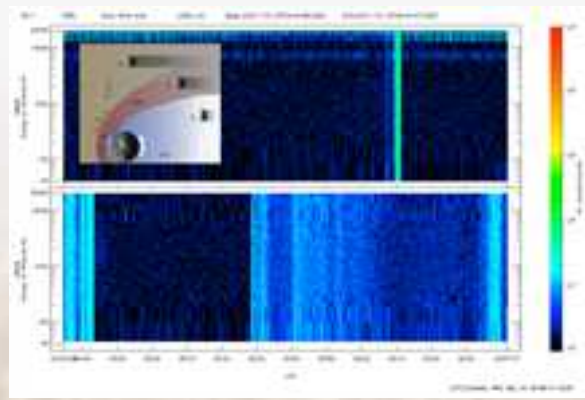
CE-1观测的月球极区日夜交界面的粒子加速事件



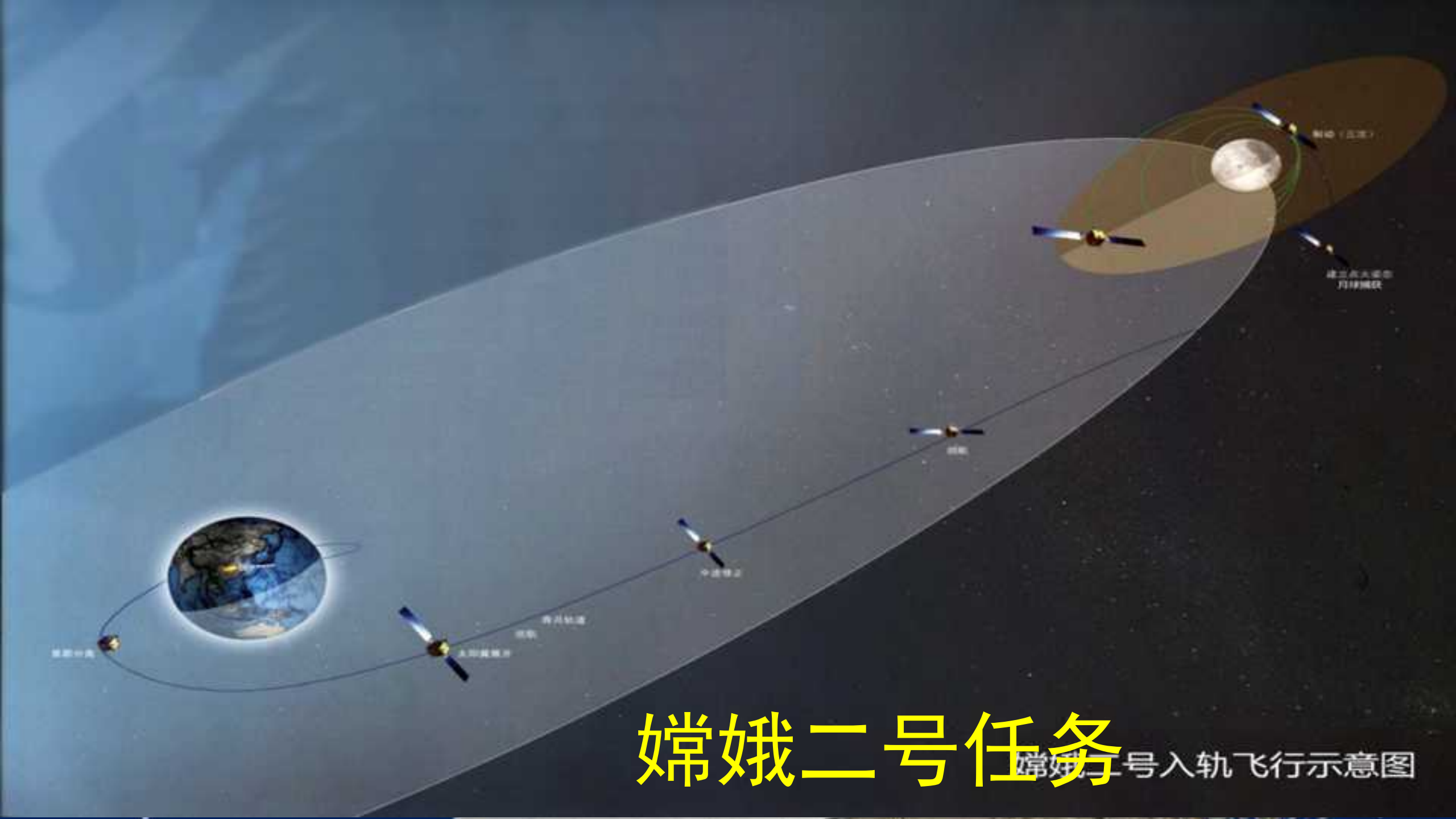
行星际太阳风的离子能谱



磁鞘中的离子能谱



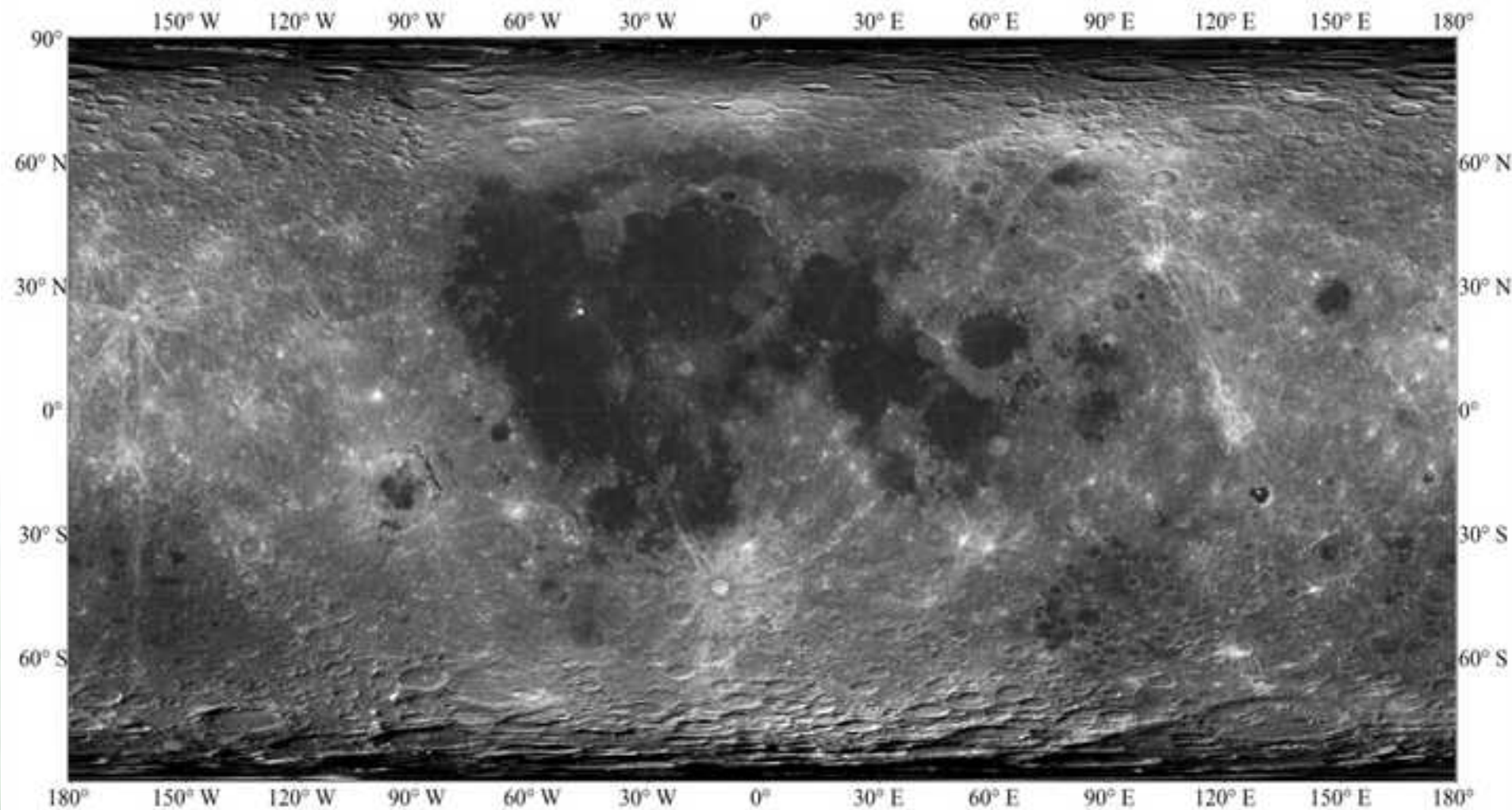
磁尾中的离子能谱



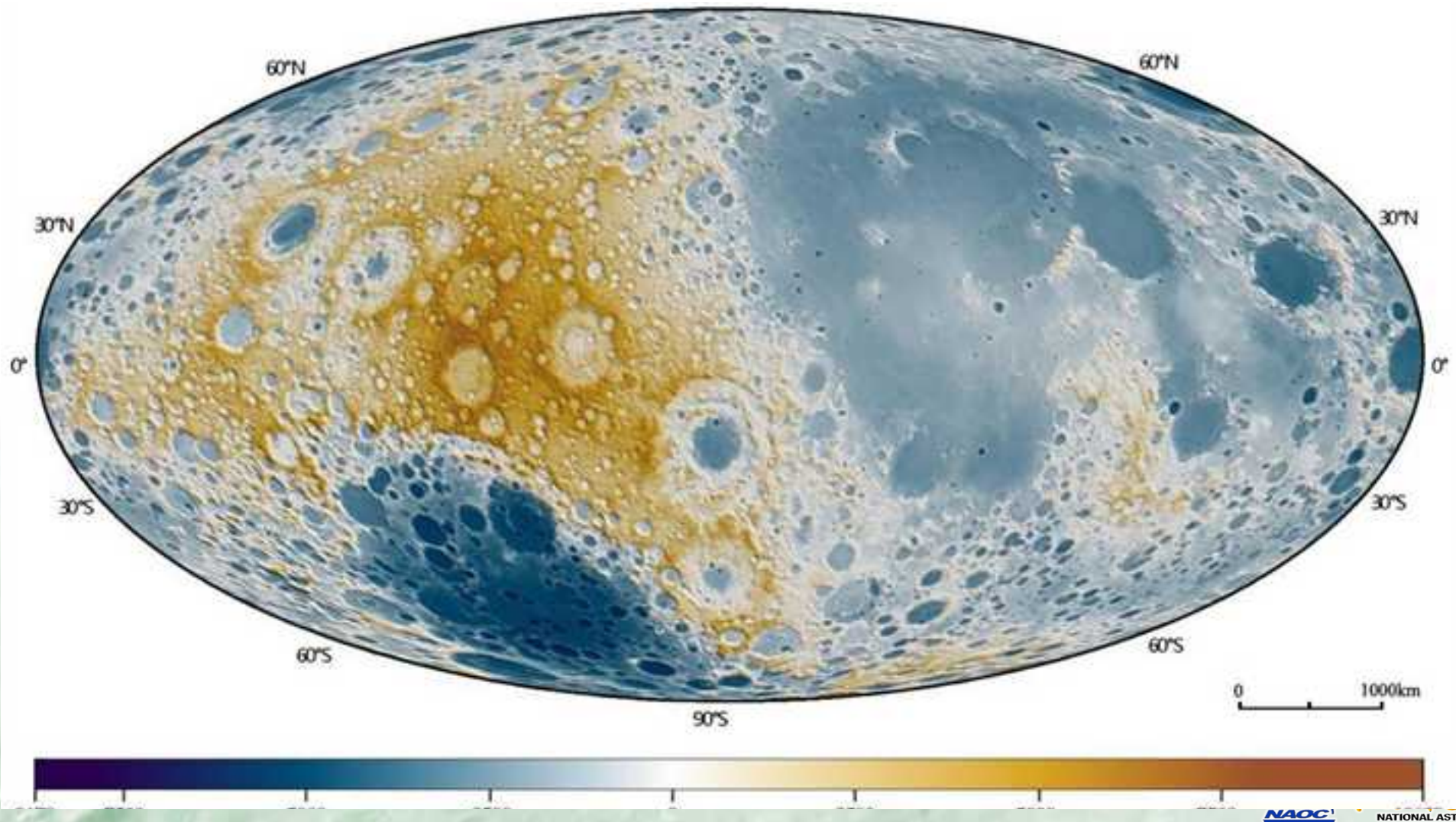
嫦娥二号任务

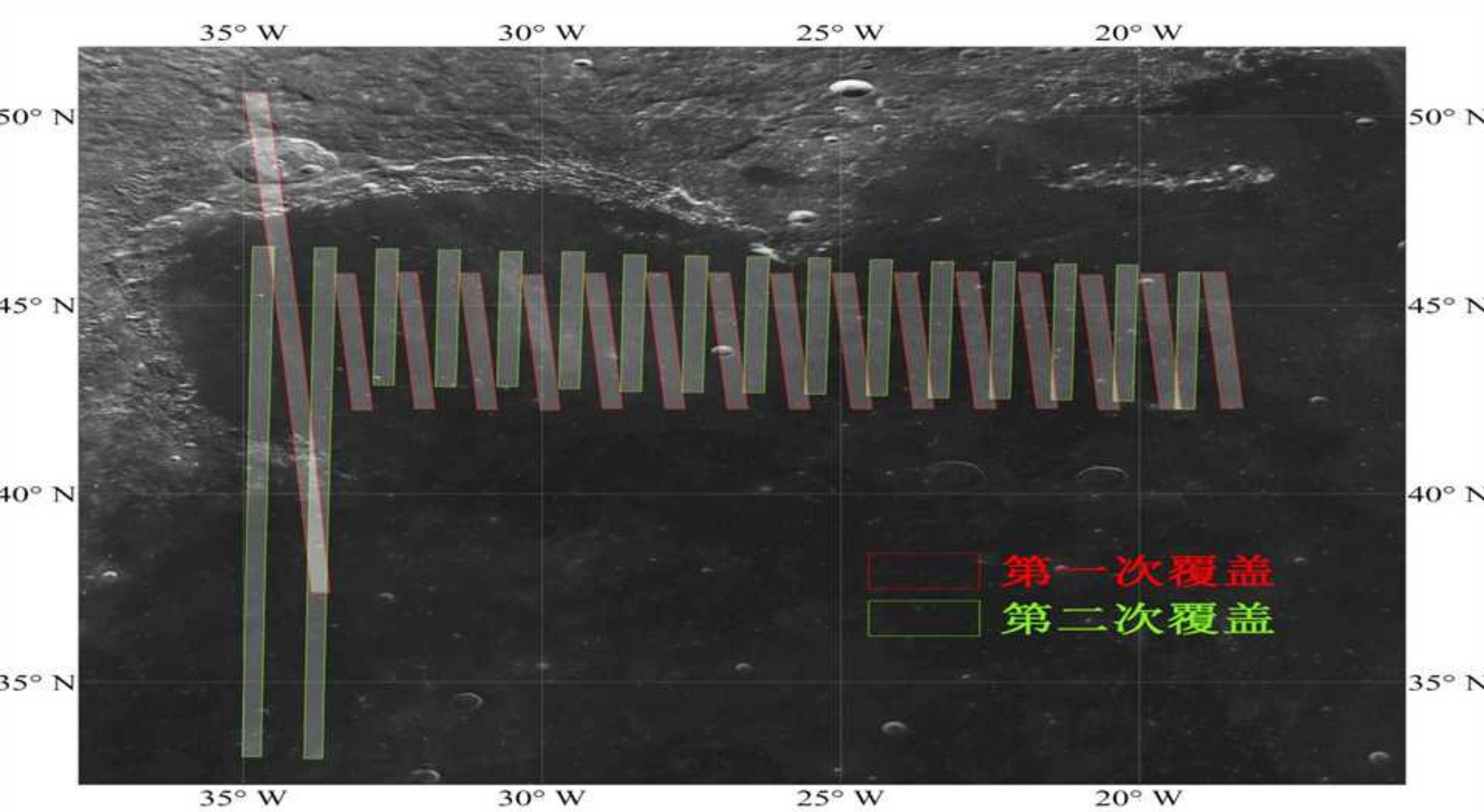
嫦娥二号入轨飞行示意图

(1) 国际上分辨率最高的全月球图像数据 (7m)

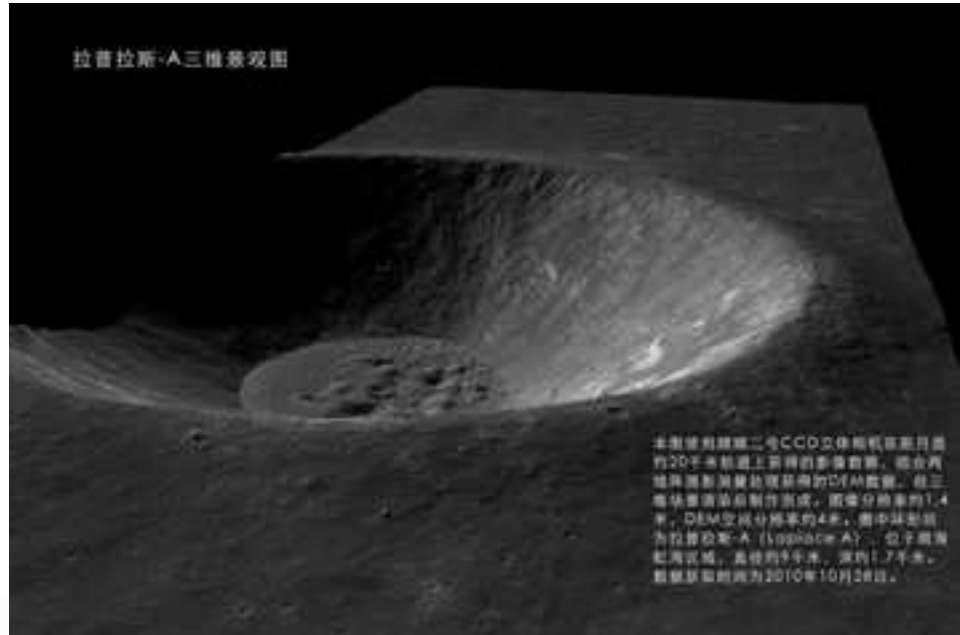
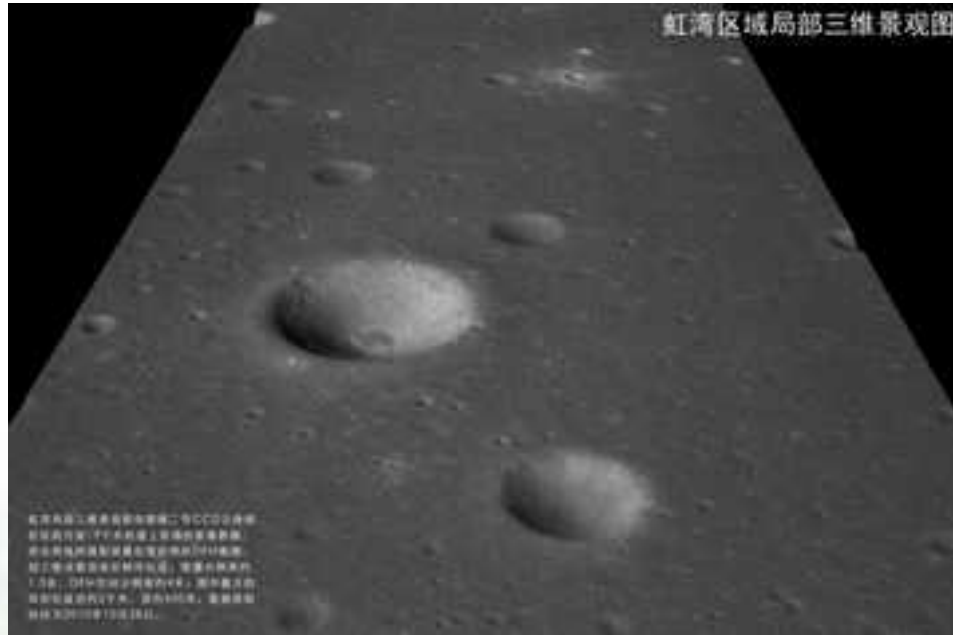


(2) 国际上分辨率最高的全月球地形DEM数据 (7m)



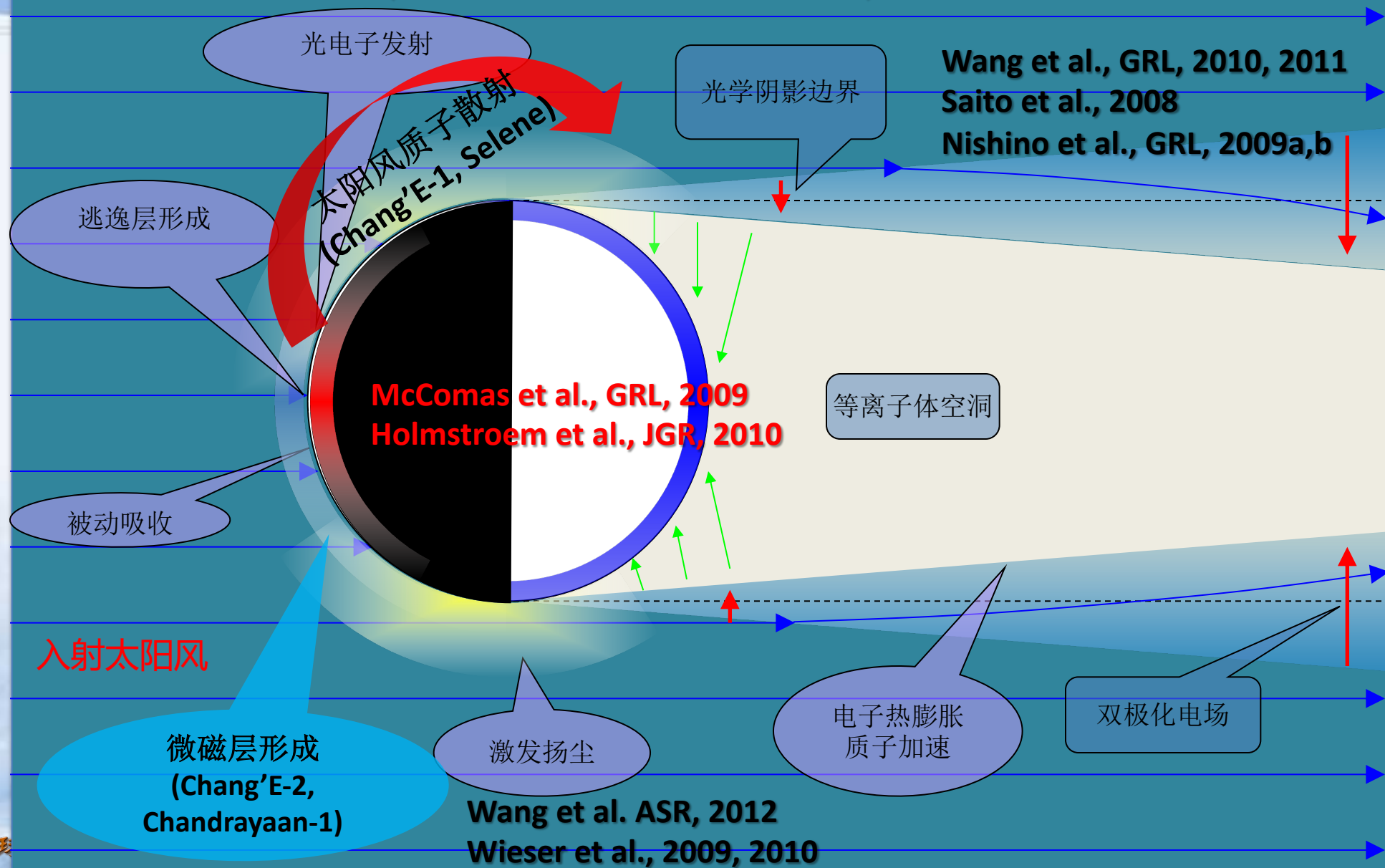


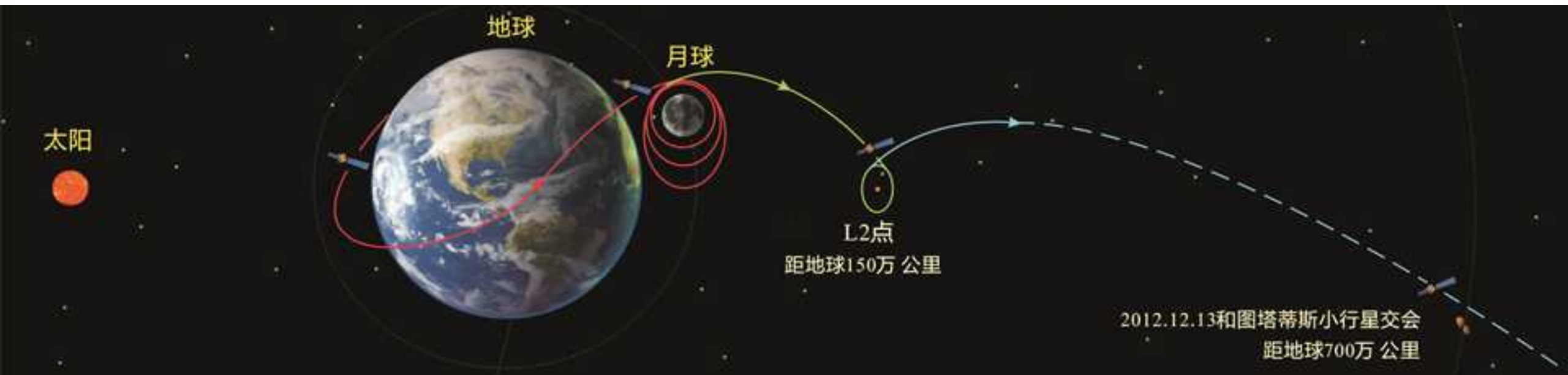
(3) 1.3m分辨率的局部影像和地形数据，达到国际先进水平。



在国际月球探测中首次采用时间延时积分（TDI）成像技术，创新设计了由地面行频数据注入和测高数据辅助两种速高比补偿成像方法，获得了7m分辨率的全月球立体影像，处于国际领先水平；获得了1.3m分辨率的局部影像，达到国际先进水平。

月表与太阳风的相互作用 (2008年之后的新认识)





CE-2 Toutatis Flyby Images



图像最大分辨率: 10 m
相对速度: 10.73 km/s
交汇距离: 3.2 km

Zou, et al. 2014



嫦娥三号任务



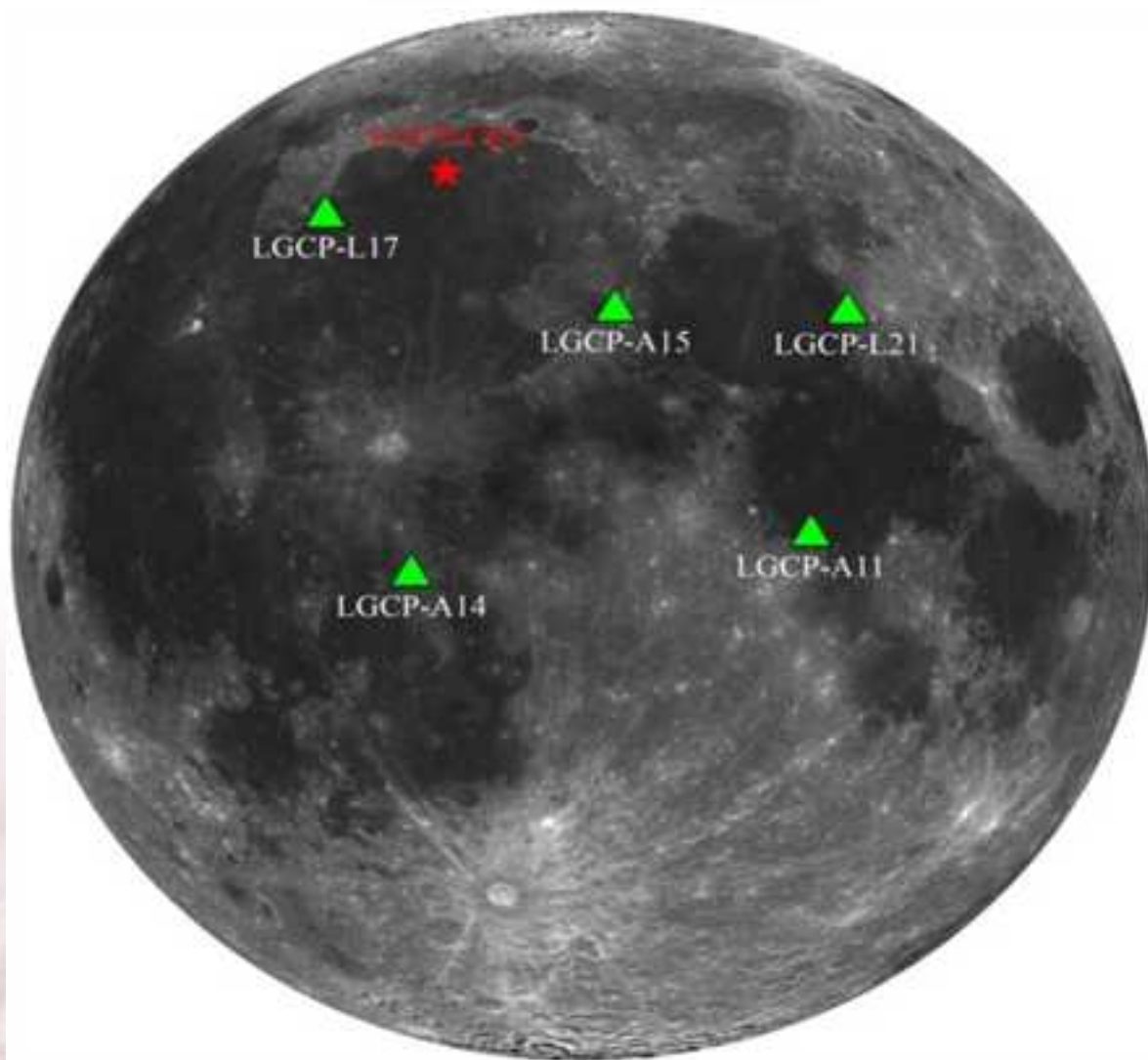
- 我国的**第一个**在地外天体上**软着陆**探测的航天器
- **测月**：探测月表地形地貌和结构构造、物质成分和矿物组成；
- **观地**：从月球上回望地球，用极紫外相机对地球等离子体层进行探测，研究地球空间环境的变化；
- **巡天**：将月基光学望远镜携带至月球上观测宇宙。



地形地貌相机拍摄的嫦娥三号探测器着陆区场景



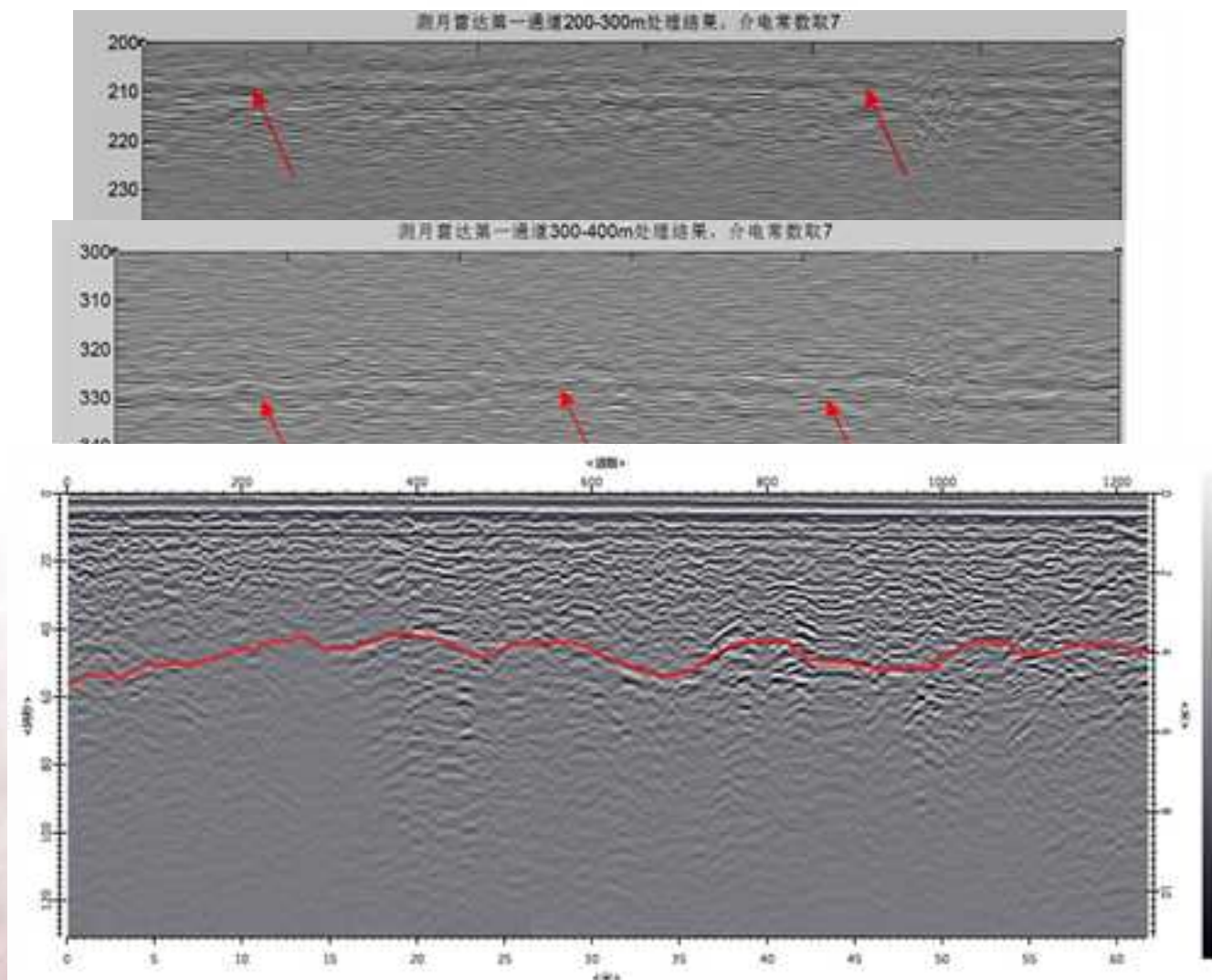
建构月面新的绝对控制点



利用CE-3影像和
高精度定位测量
数据，建立了月
表第6个绝对测
量控制点。

Wang, et al. 2014

巡视区浅层结构分析研究



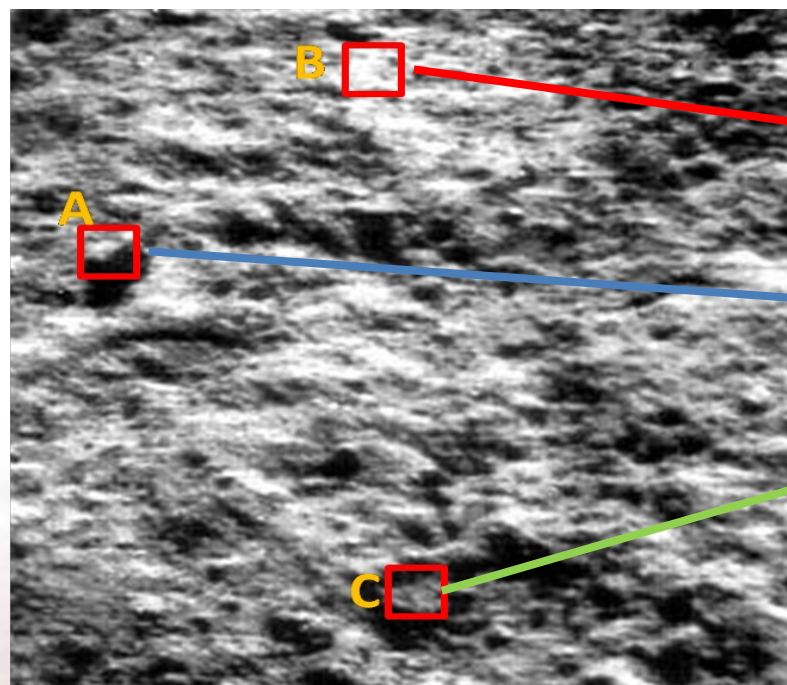
国际上首次利用巡视器成功探测到月亮浅层分层信息和月壤分层结构:

通过对获取的测月雷达回波数据分析, 在月面下深度为125m、210m和330m左右发现复杂的分层结构, 且厚度分布不均匀, 初步分析厚度约为4~10米, 可能代表的是不同期次喷发的玄武岩之间的分界。

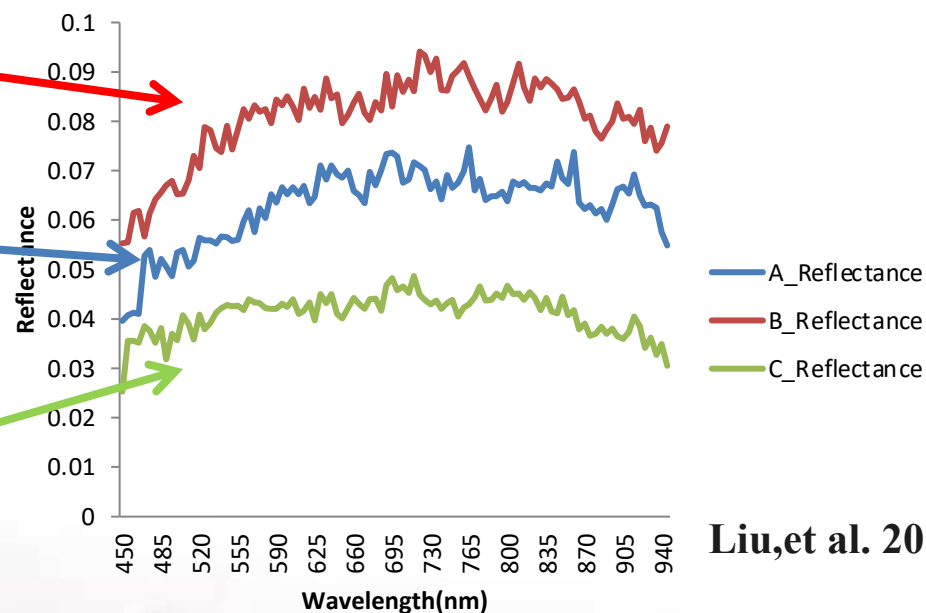
Su, et al. 2014

(2) 月表物质成分分析

月表矿物的红外成像光谱分析



探测区域1可见近红外反射率光谱曲线

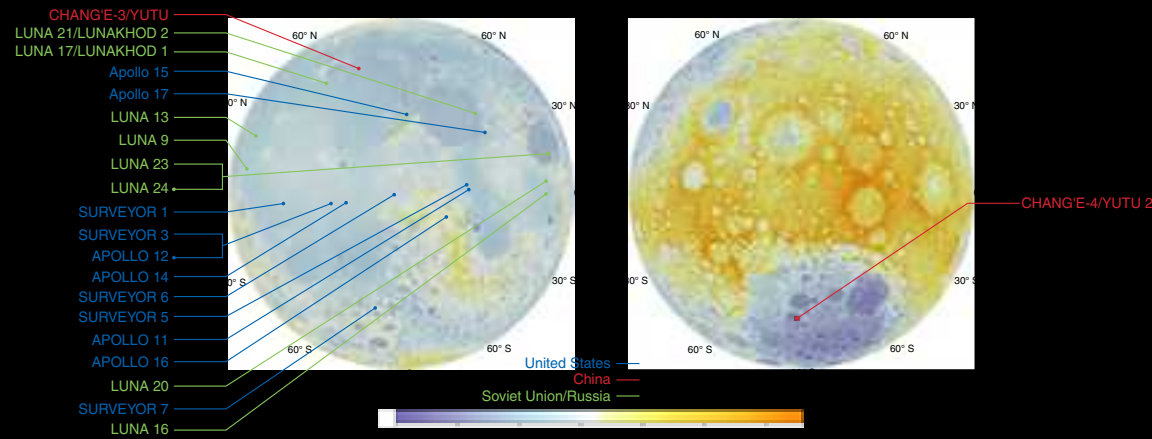
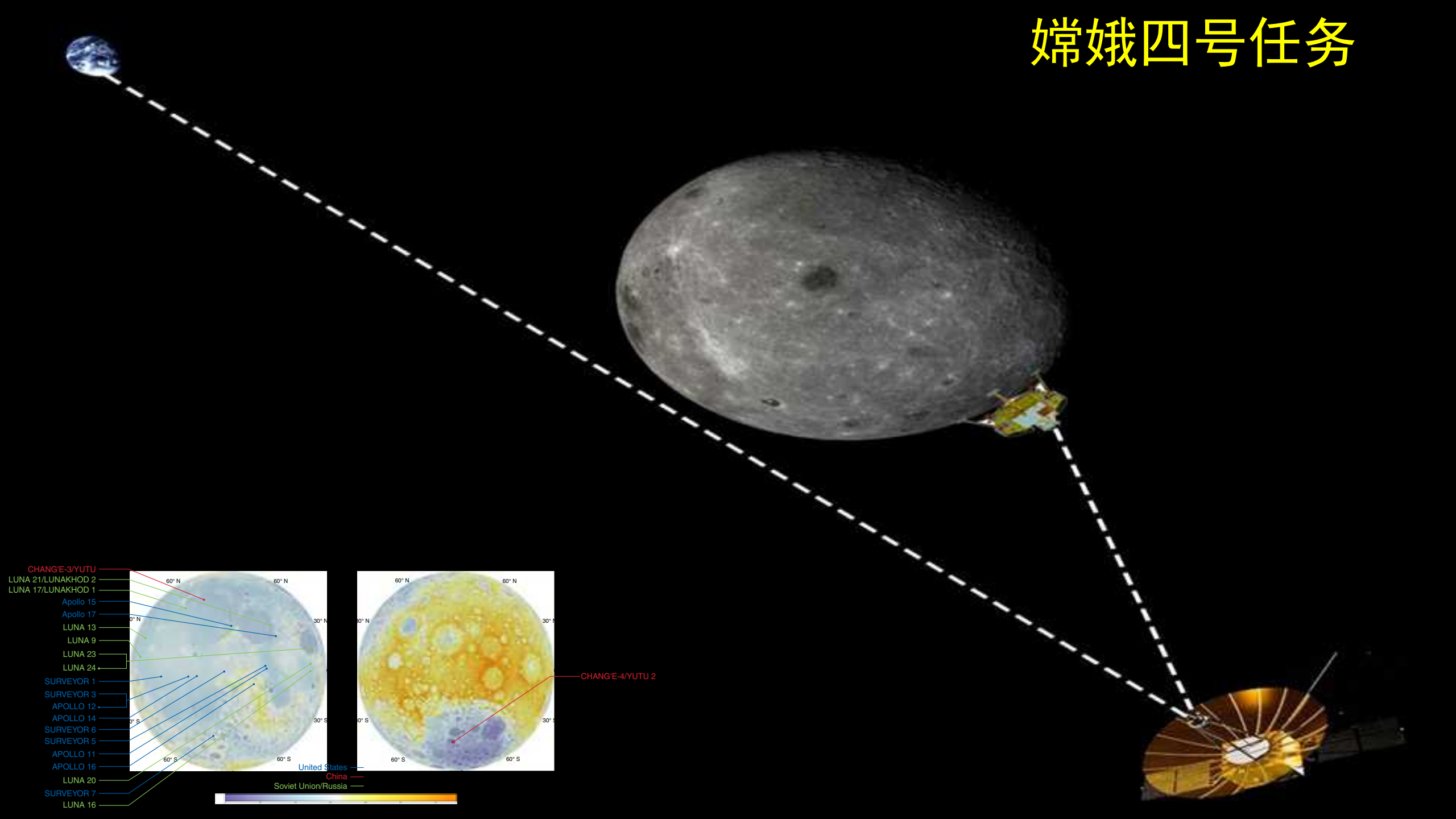


Liu, et al. 2014

- 总共获取了840帧可见近红外光谱图像数据和2240帧短波红外光谱数据。
- 通过对红外成像光谱仪科学数据，识别出了月壤中橄榄石和辉石在1000nm附近典型的吸收峰和辉石在2000nm附近较弱的吸收峰特征。

发现月球表面一种新型玄武岩，成果2015年发表在Nature子刊。

嫦娥四号任务

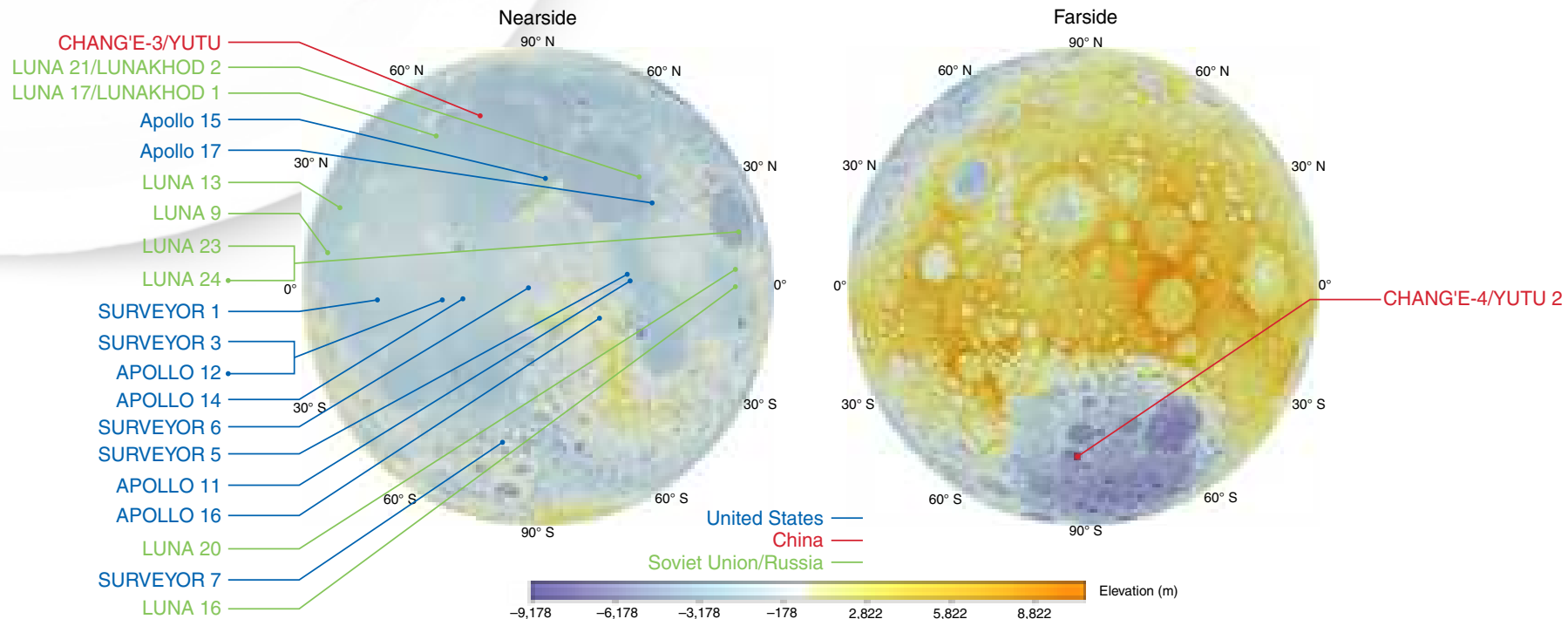


嫦娥 Chang'E-4

The scientific objectives for Chang'E 4 mission:

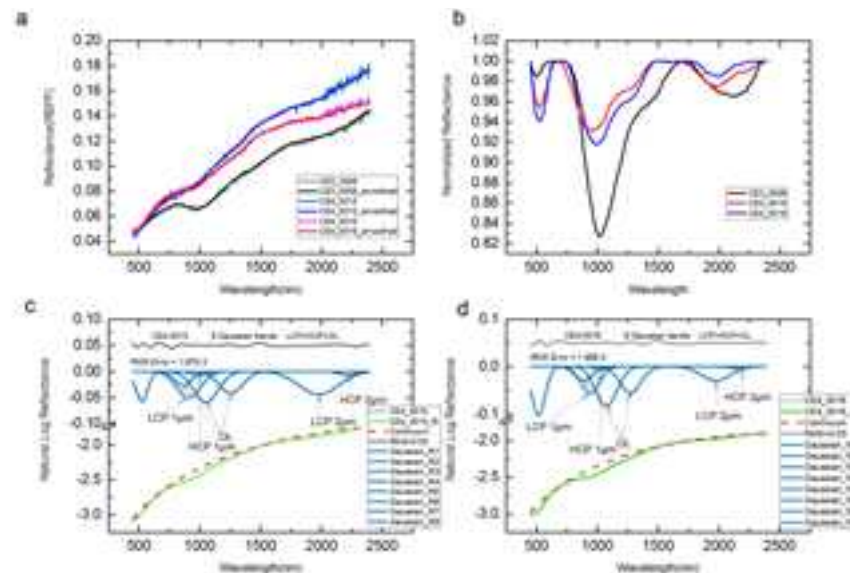
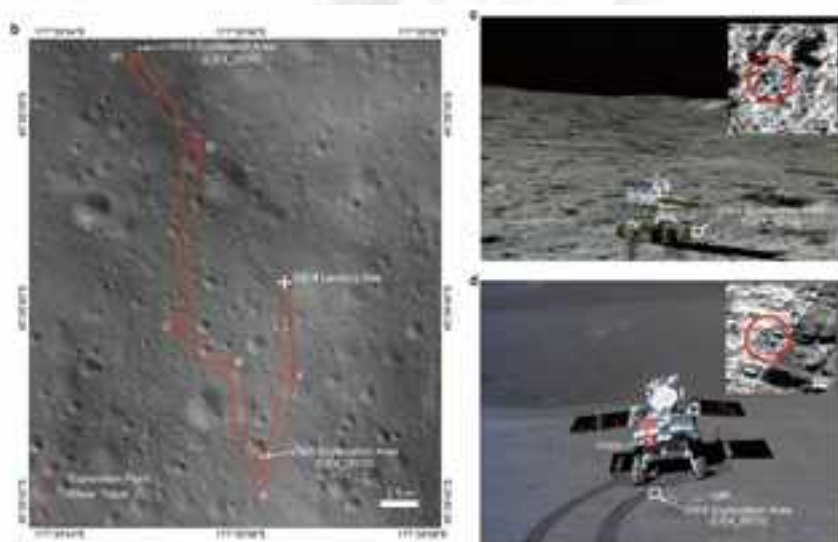
- 1) The topographic and the mineralogical composition investigation on the lunar far side;
- 2) Shallow structure investigation on the lunar far side of roving area;
- 3) Low-frequency radio astronomical study on the lunar surface.

Wu W R, et al. Nature Geoscience, 2019



利用可见近红外光谱仪 (VNIS) 在月球背面南极-艾特肯盆地进行了就位分析, 分析证实CE-4着陆区月壤物质中橄榄石相对含量最高, 低钙辉石次之, 仅含有很少量的高钙辉石。这种矿物组合很可能代表了源于月幔的深部物质。

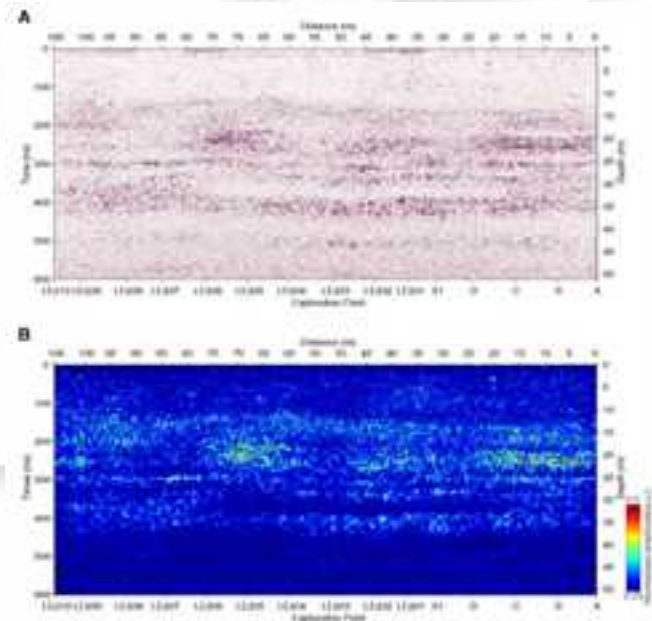
Li C L, et al. Nature, 2019



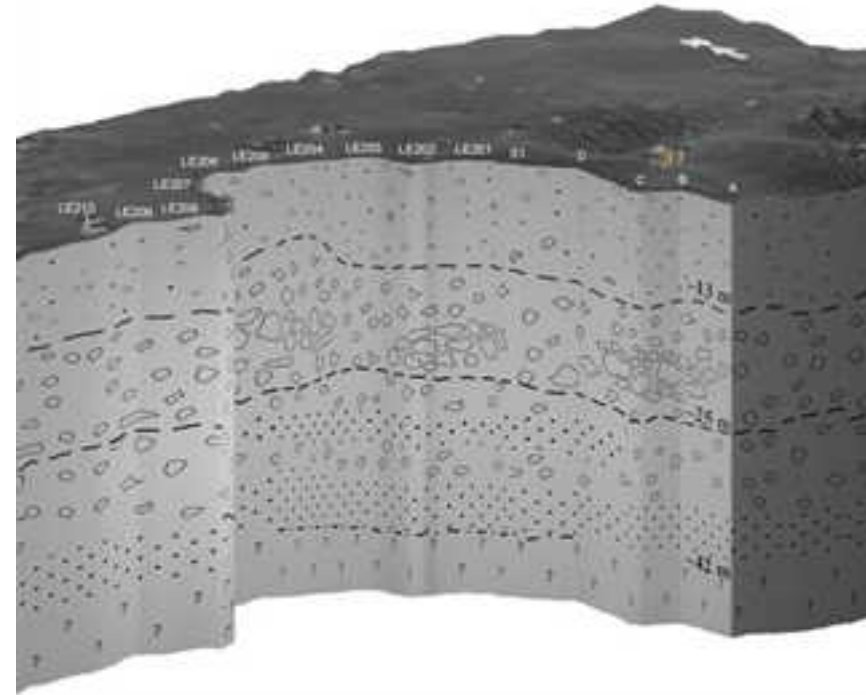
The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'E-4 Lunar Penetrating Radar

利用测月雷达对着陆区进行了巡视探测，获得了嫦娥四号着陆区浅层结构的分布。

Li C L, et al. 2019



LPR data at 500 MHz



Schematic representation of the subsurface geological structure at the CE-4 landing site inferred from LPR observations. The subsurface can be divided into three units: **Unit 1 (up to 13 m)** consists of lunar regolith, **Unit 2 (depth range 13–25 m)** consists of coarser materials with embedded rocks, and **Unit 3 (depth range 25–42 m)** contains alternating layers of coarse and fine materials.

数据成果

存档数据量

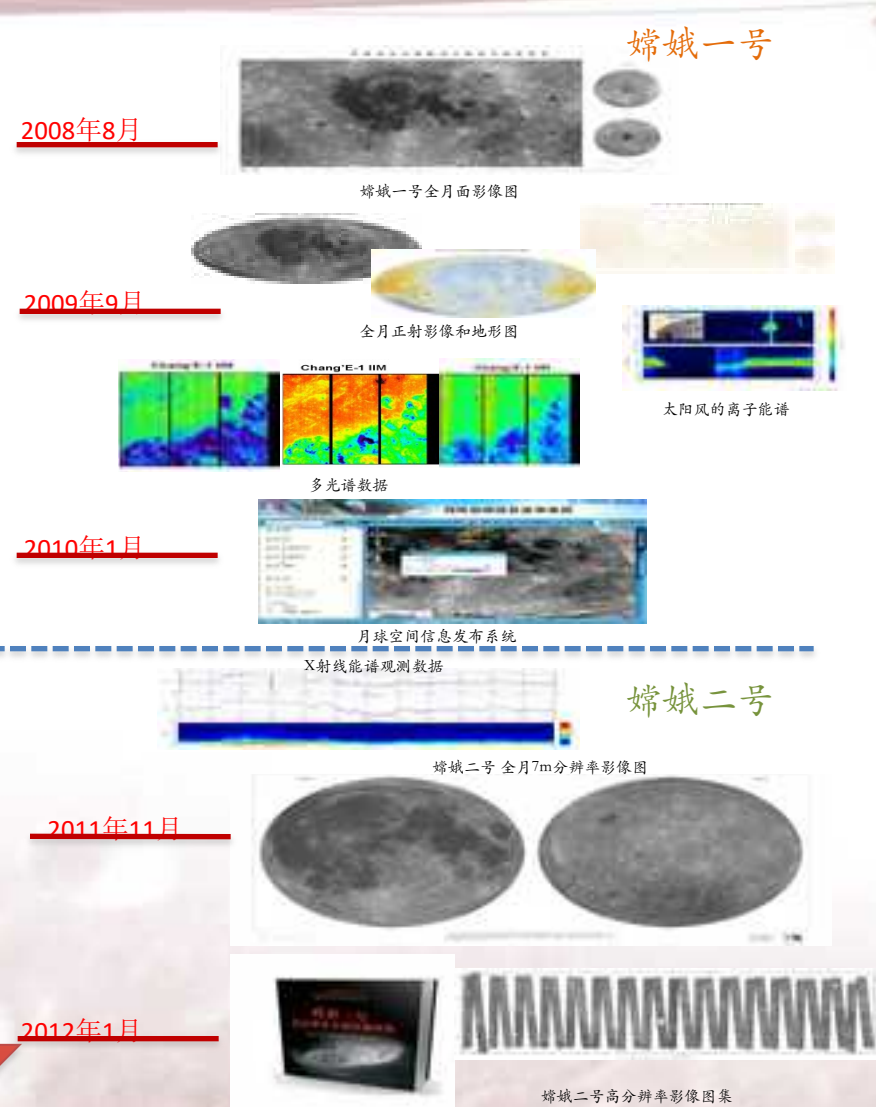
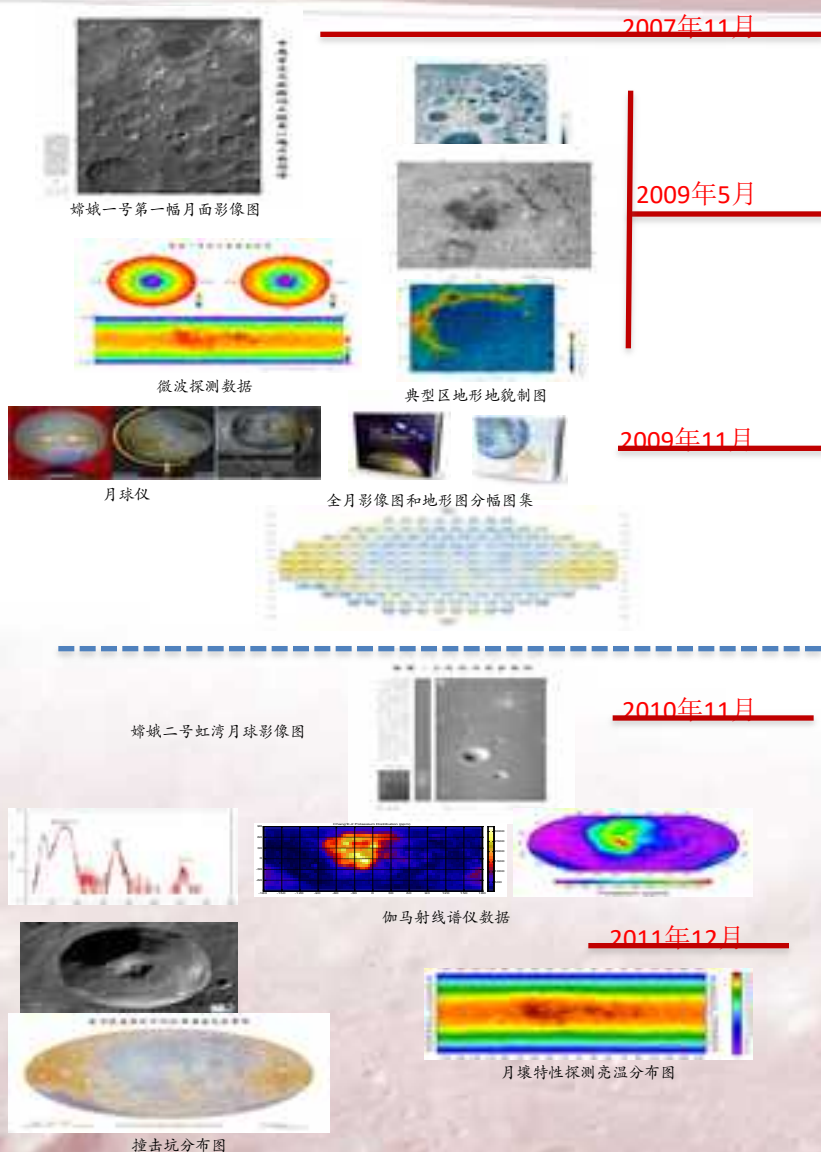
CE1 4.6TB		
产品级别	存档文件数	存档数据量(MB)
无级别	1309	1596941.01
0级数据	13992	1493150.80
1级数据	48398	455925.42
2级数据	75234	1310139.87
3级数据	9562	21471.83
高级数据	25	21477.36
总计	139176	4859072.8

CE2 15.8TB		
产品级别	存档文件数	存档数据量(MB)
无级别	1092	3603991.94
0级数据	5552	5475641.10
1级数据	40743	3313617.23
2级数据	75410	3284917.07
3级数据	934	840714.64
高级数据	1868	840742.24
总计	125599	16518909.58

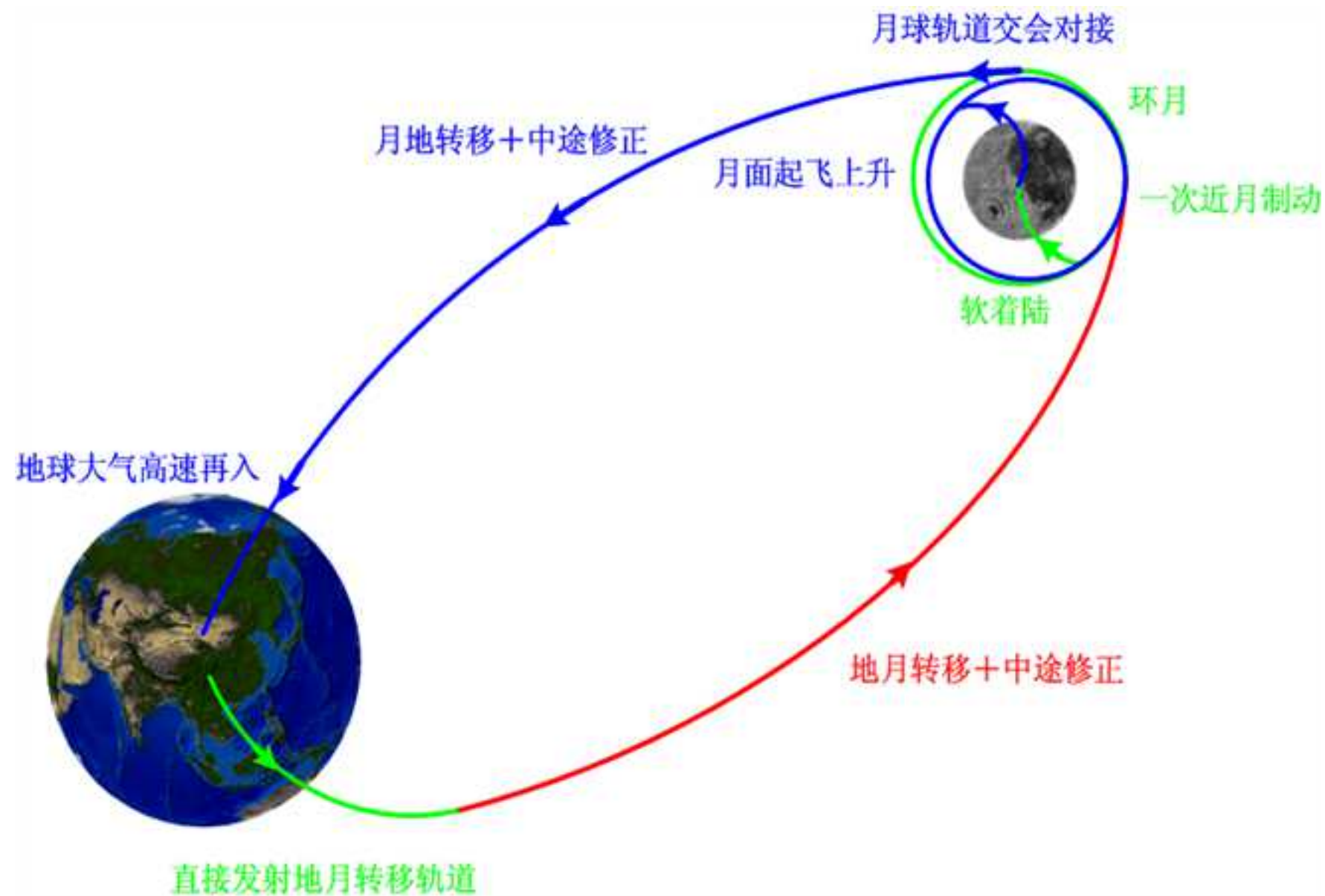
CE3 4.9TB		
产品级别	存档文件数	存档数据量(MB)
无级别	603	1408320.49
0级数据	1416	821931.14
1级数据	340	343041.41
2级数据	320479	2556073.86
高级数据	16	155.36
总计	322854	5129522.26
	322854	5129522.26

内 容	参 数
全月球影像图数据	分辨率120m
全月球三维地形数据	分辨率500m
月球标准基础地图（Base Map）数据	120m
元素含量分布图	U、Th、K全球；Mg, Al, Si, Fe, Ti局部
多光谱图像数据	480~960nm，32谱段，覆盖79%月面
微波辐射亮温数据	全月球黑夜、白昼亮温分布；数据覆盖全月球4次，
近月空间环境数据	高能粒子和低能离子；近3000小时数据；不同环境空间。
全月球影像图数据	分辨率7m，全月球
全月球三维地形数据	分辨率7~20m，全月球
高分辨影像图数据	分辨率1~1.5m，虹湾局部
高分辨地形图数据	分辨率3m，虹湾局部
元素含量数据	U、Th、K全球；Mg, Al, Si, Fe, Ti局部,约4500小时
微波亮温数据	全月球黑夜、白昼亮温分布；数据覆盖全月球8次；约5000小时
空间环境数据	地月空间数据，约210小时 近月空间数据，约4710小时 L2点数据，约2846小时 行星际空间数据，约680小时

发布的数据产品及成果

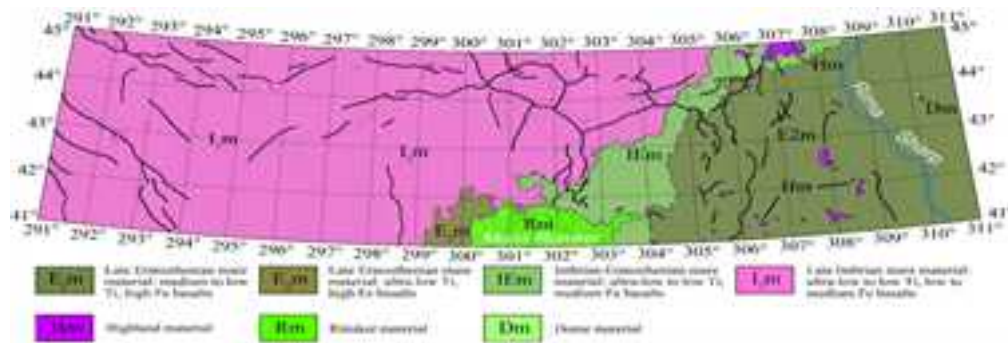
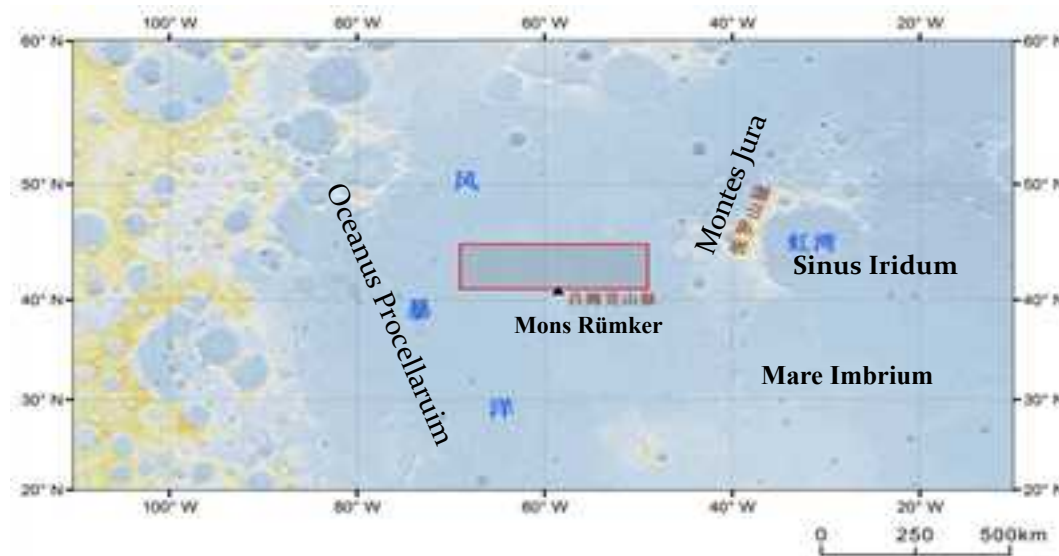
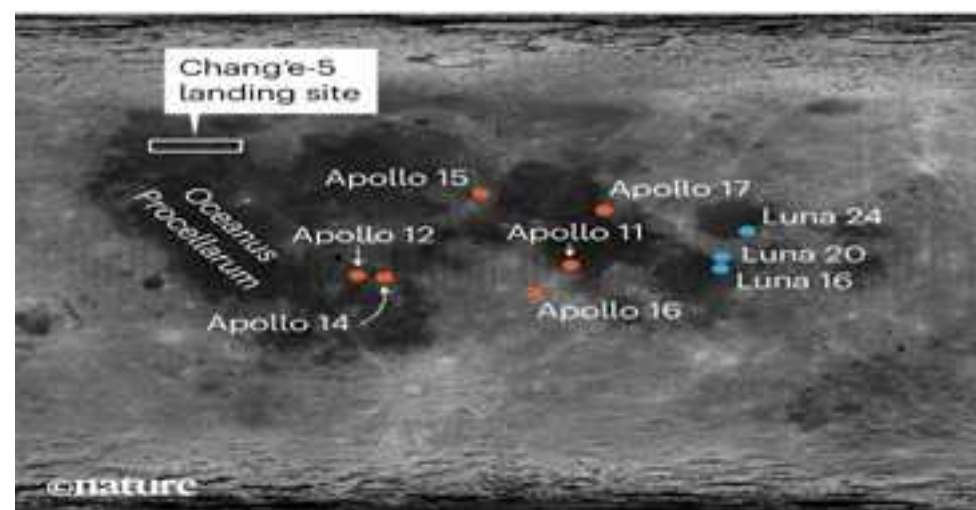
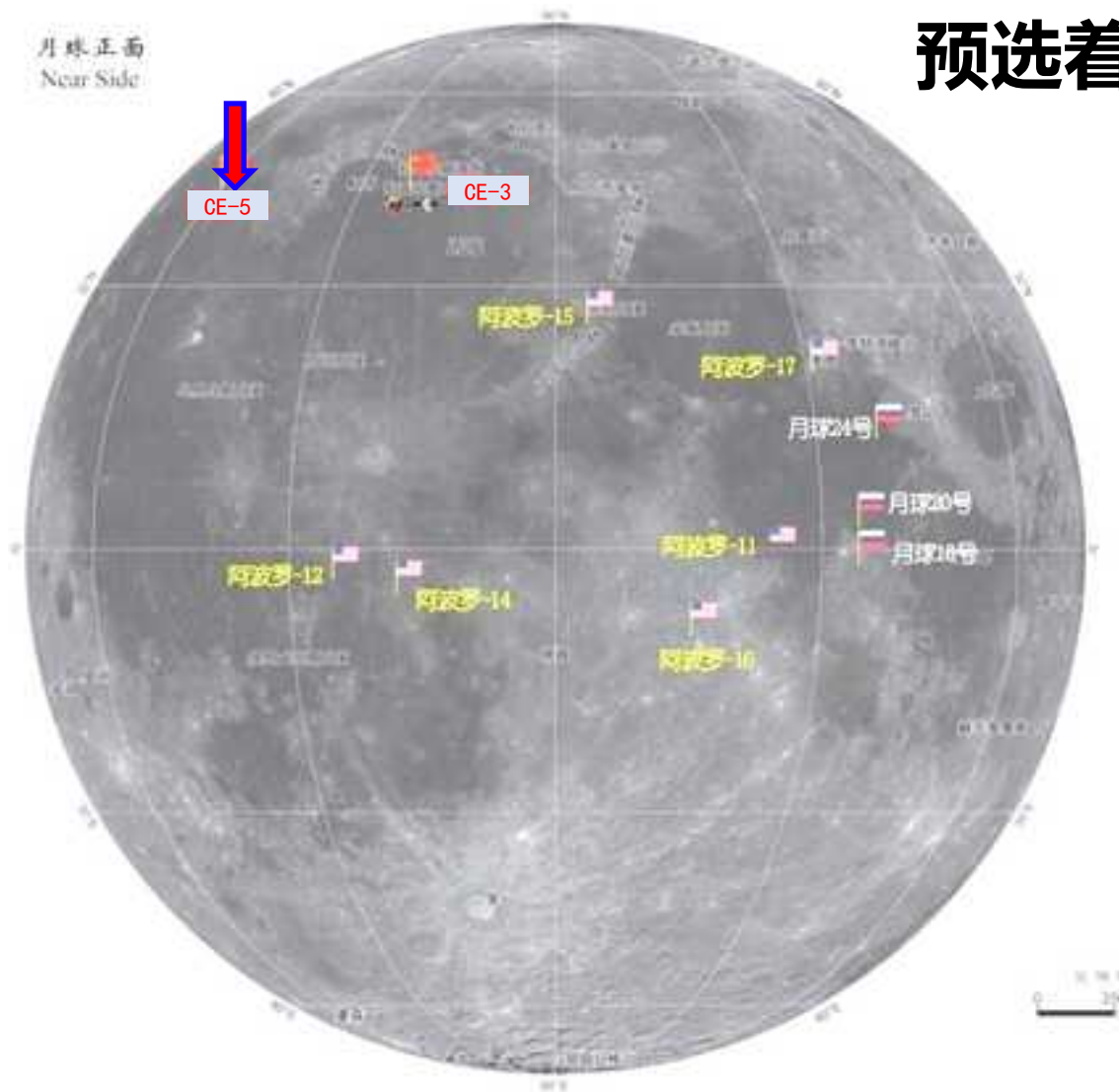


嫦娥五号任务

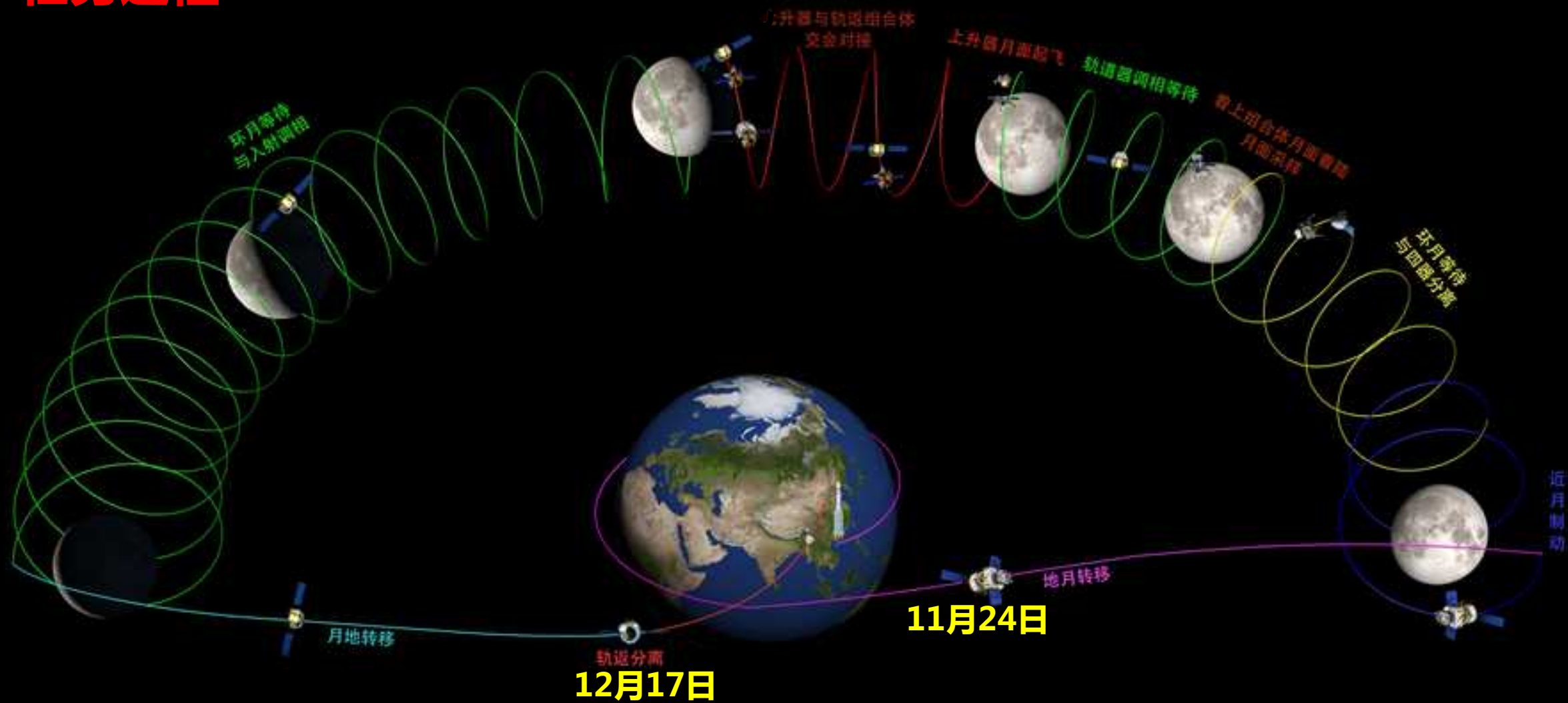


4.1 嫦娥五号任务概况

预选着陆区



任务过程

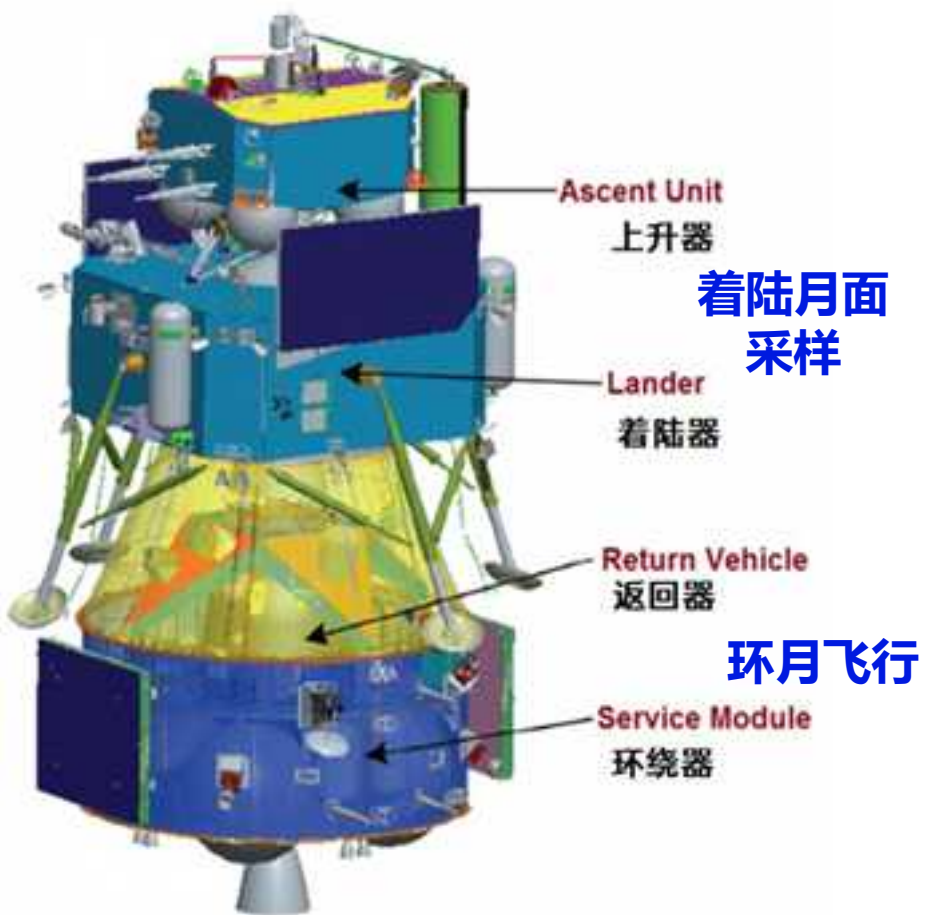


4.1 嫦娥五号任务概况



2020年11月24日4时30分，在海南文昌航天发射场，用长征五号遥五运载火箭成功发射嫦娥五号探测器

4.1 嫦娥五号任务概况

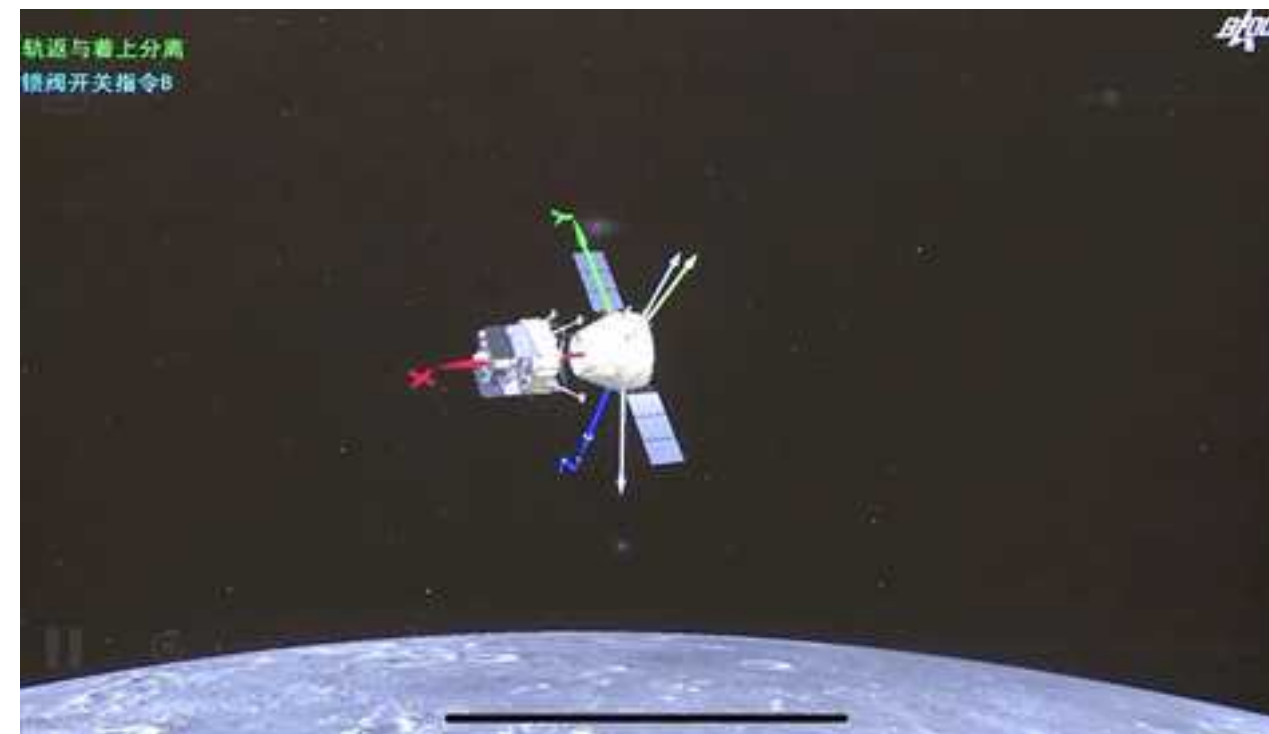


11月28日20时58分，嫦娥五号探测器近月制动正常，顺利进入环月轨道。

4.1 嫦娥五号任务概况

四器分离

任务过程



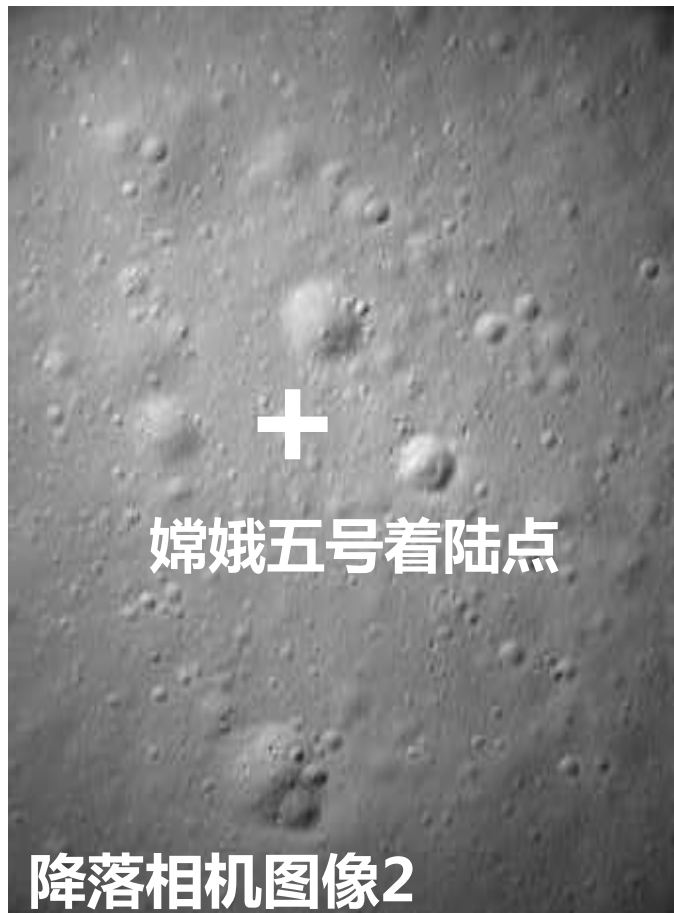
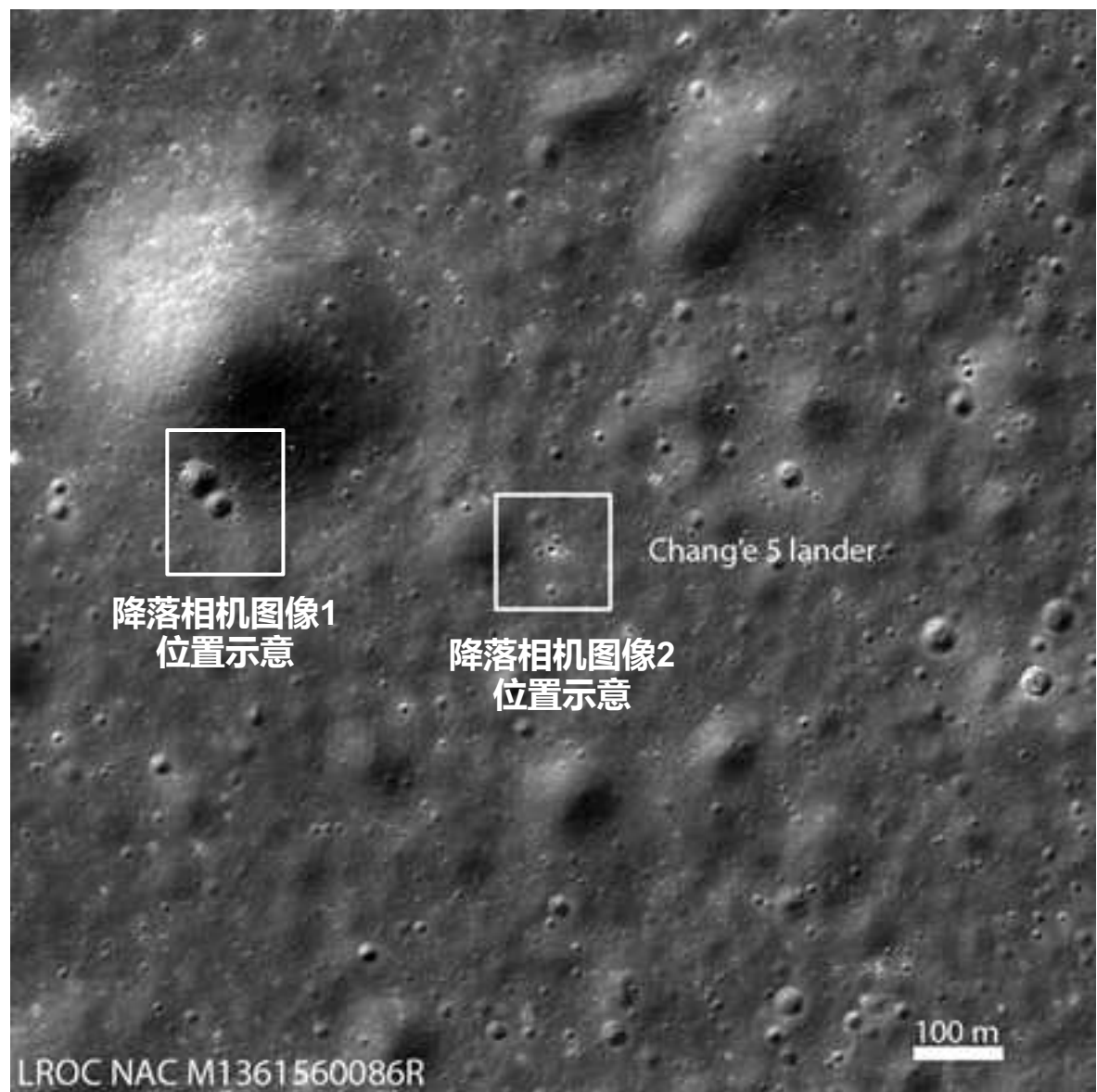
11月30日4时40分，嫦娥五号探测器着上组合体与轨返组合体分离。
(左图为仿真视频，右图为实际拍摄)

4.1 嫦娥五号任务概况



12月1日23时11分，嫦娥五号探测器成功着陆。

4.1 嫦娥五号任务概况



	LRO NAC定位 (deg)	在CE2上初步定位 (deg)	偏差 (m)
纬度	43.0576	43.0581	-15
经度	-51.9161	-51.9160	-2
高程	-2570	-2550	-20
	平面位置综合偏差		15
	三维位置综合偏差		25

4.1 嫦娥五号任务概况

月面钻取

任务过程



12月2日4时53分，嫦娥五号着陆器和上升器组合体完成了月球钻取采样及封装（左图为仿直视频 右图为实际拍摄）

4.1 嫦娥五号任务概况

月面表取



任务过程



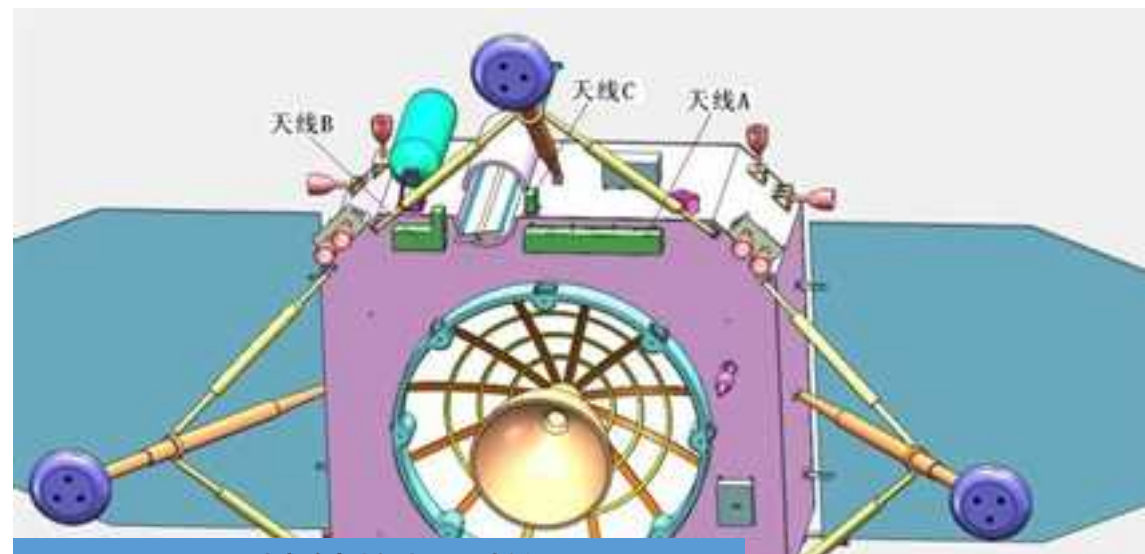
12月2日22时，经过约19小时月面工作，顺利完成月球表面自动采样，并已按预定形式将样品封装保存在上升器携带的贮存装置中。（左图为仿真视频，右图为实际拍摄）

4.1 嫦娥五号任务概况

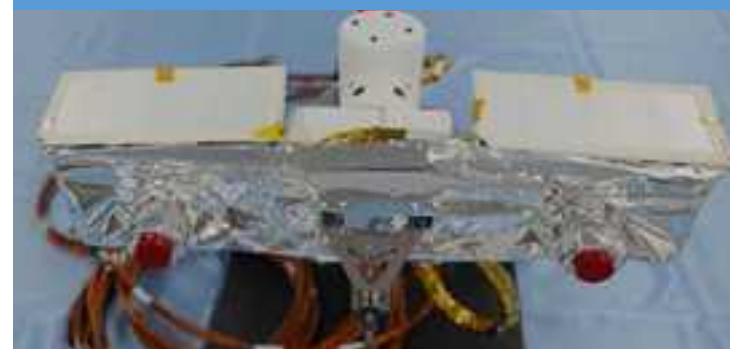
着陆区现场调查



- 降落过程中，降落相机工作
- 月面钻取过程中，月壤结构探测仪工作
- 月面表取过程中，全景相机、矿物光谱分析仪工作
- 采样完成后，进行国旗展示



月壤结构探测仪
(中科院空天信息研究院)

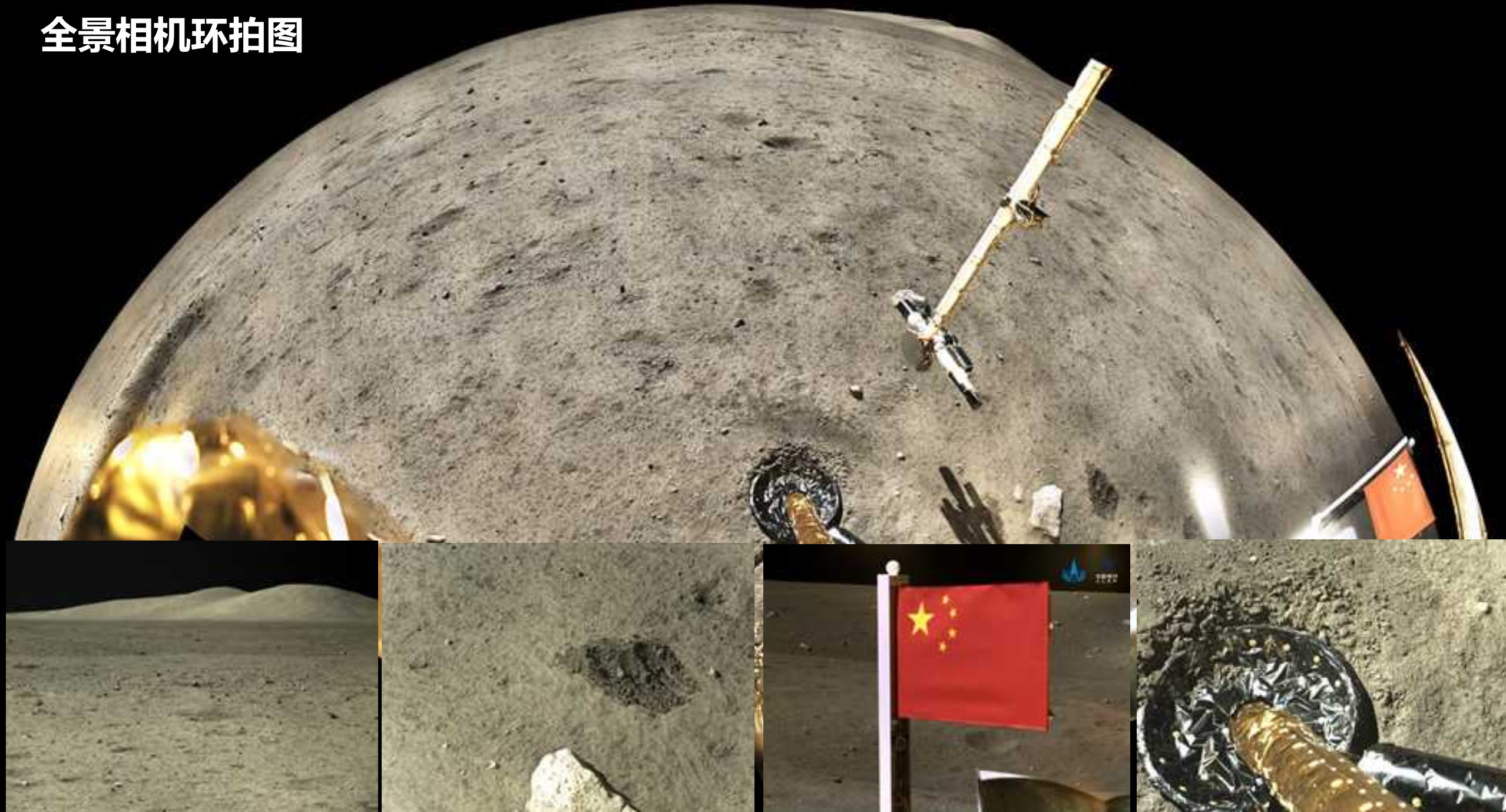


全景相机 (中科院西光所)
转台 (中科院沈阳自动化所)



月球矿物光谱分析
(中科院上海技物所)

全景相机环拍图



4.1 嫦娥五号任务概况

上升器携带样品起飞



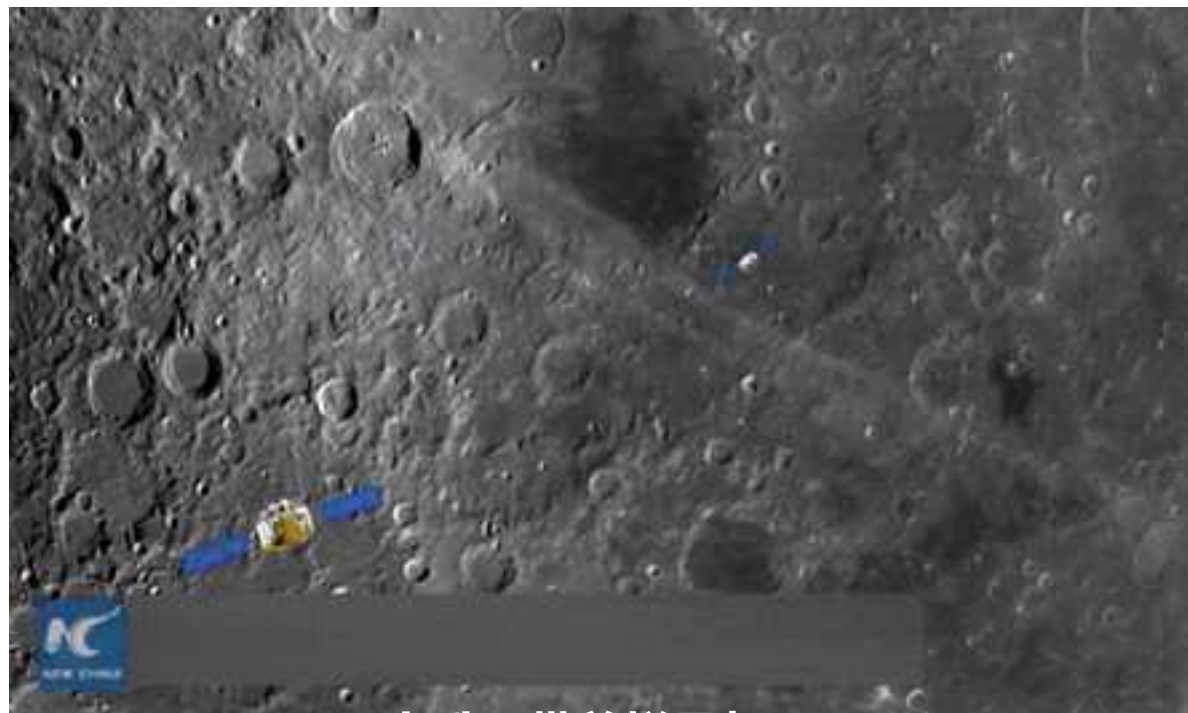
任务过程



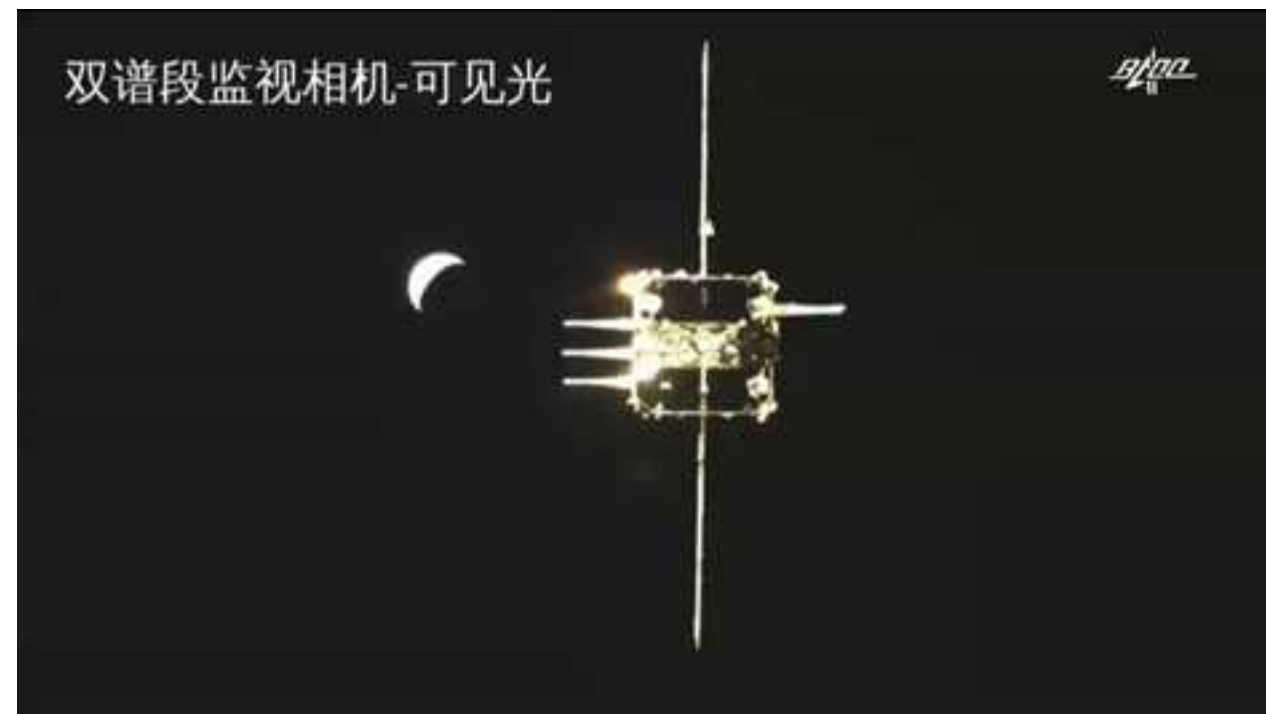
12月3日23时10分，嫦娥五号上升器3000N发动机工作约6分钟，成功将携带样品的上升器送入到预定环月轨道。这是我国首次实现地外天体起飞。
(左图为仿真视频，右图为实际拍摄)

4.1 嫦娥五号任务概况

上升器和轨道器在月球轨道交会对接



任务过程

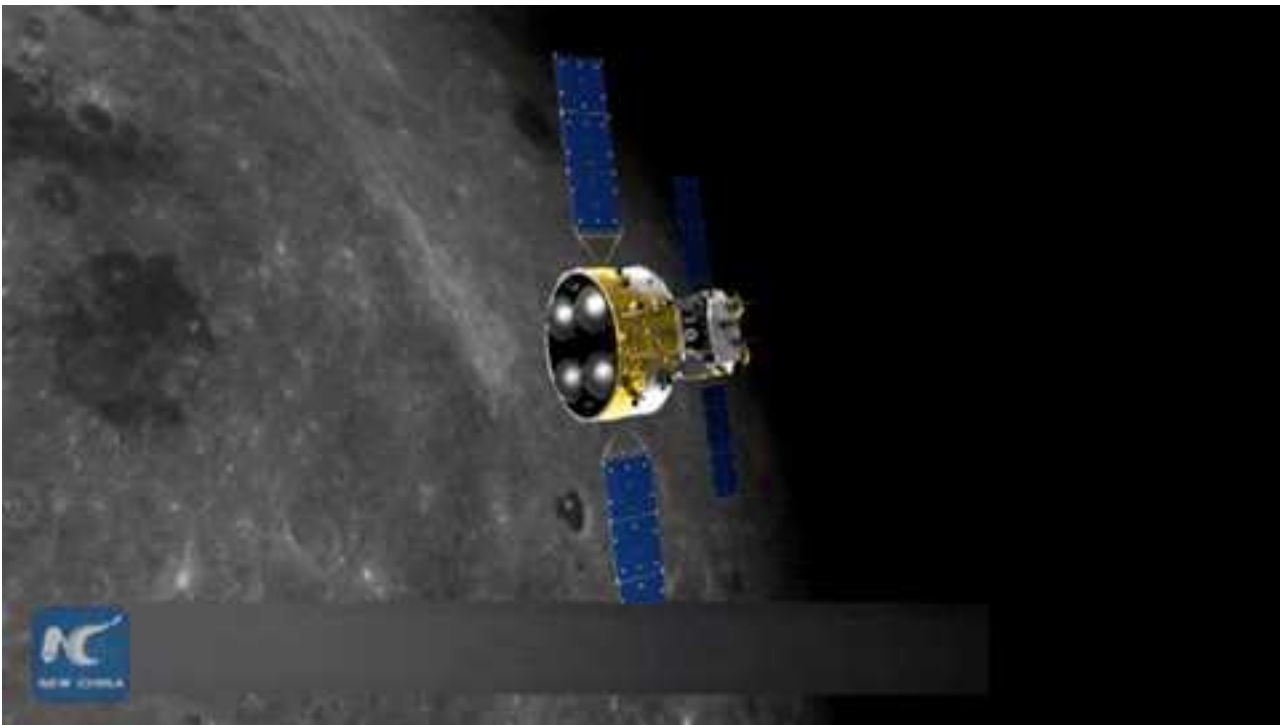


12月6日5时42分，嫦娥五号上升器成功与轨返组合体交会对接。这是我国首次实现月球轨道交会对接。

(左图为仿直视频 右图为实际拍摄)

4.1 嫦娥五号任务概况

样品转移至返回器



任务过程



12月6日6时12分将样品容器安全转移至返回器中。

4.1 嫦娥五号任务概况



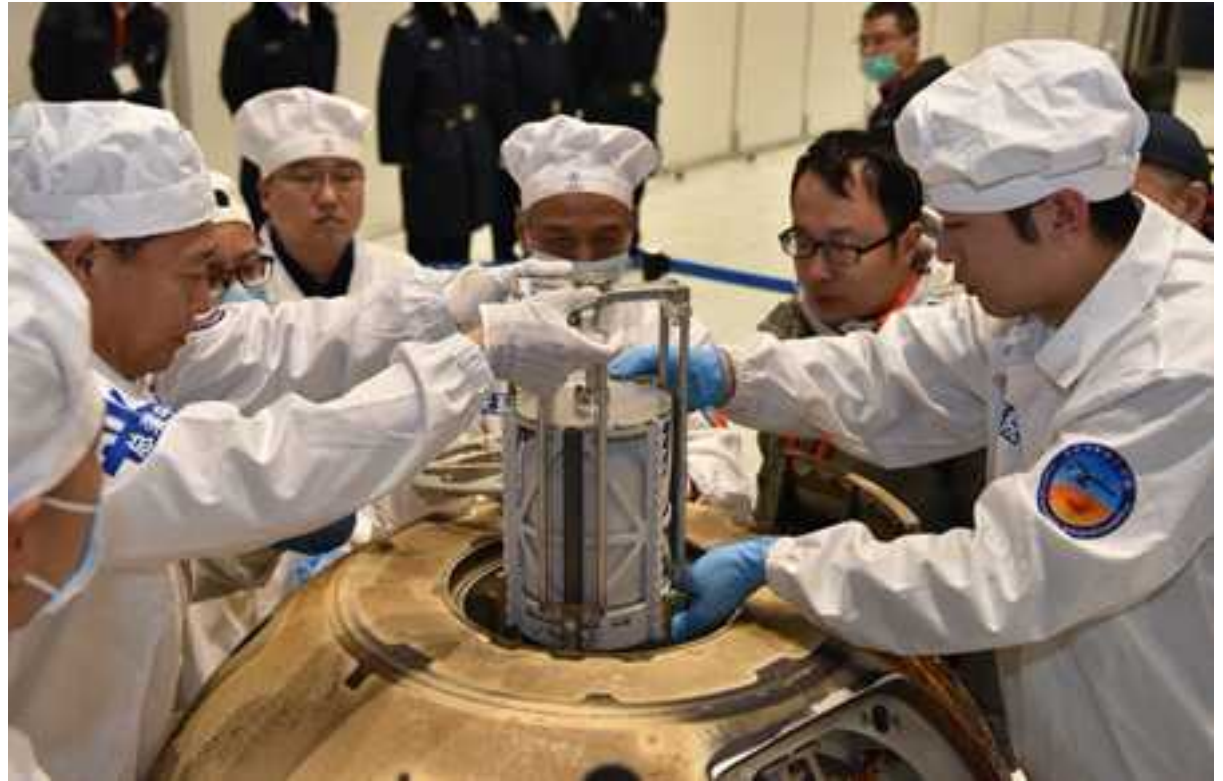
12月17日凌晨，返回器再入地球大气层，返回地球

一、月球样品交接转运



2020年12月17日01:59，嫦娥五号返回器在内蒙古四子王旗预定区域成功着陆，圆满完成我国首次地外天体采样返回任务。

一、月球样品交接转运



12月17日22:00，在航天五院月球样品封装装置从返回器取出

一、月球样品交接转运

(1) 技术交接



**12月18日9:30，在国家天文台进行月球样品封装装置外观检查、拍照、称重
探测器系统、地面应用系统参加**

二、样品处理存储

2.1 处理前准备

2.2 封装装置解封

2.3 样品分样存储

2.1 处理前准备

- 操作台和实验设备状态检查；
- 接触样品的工器具清洗；



设备类别	技术指标	
样品存储 处理 操作台	水、氧含量	提供并维持高纯氮气环境， 氮气纯度为99.9995% 经过净化单元后，存储环境的 水、氧指标<5ppm
	箱体气压	密封实验操作台箱体内气压为 1.03个大气压 （约1043mbar），工作压力可设定在范围 $\pm 15\text{mbar}$
	设备材质	主操作区前后面板为 钢化玻璃 手套材料选用 丁基橡胶 密封材料选用 氟橡胶 接触样品材质 石英玻璃、304不锈钢和特氟龙

2.1 处理前准备

□样品放射性测量



12月18日-19日，中国原子能科学研究院401所参与测试

2.2 封装装置解封

封装装置解封工作内容：

封装装置
预处理



封装装置
转移至
解封舱



封装装置解封
和气体采集



封装装置
转移至
操作舱



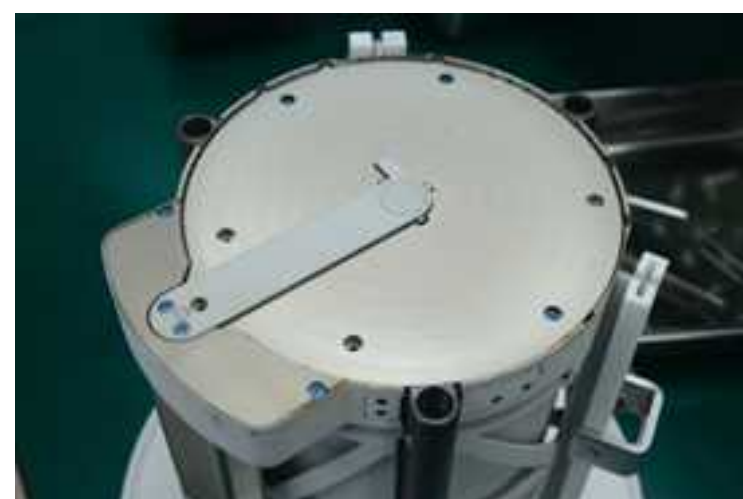
铲取样品容器和
钻取样品容器
分开

2.2 封装装置解封

(1) 封装装置预处理



12月20日17:00，密封封装装置外观清洗



12月20日18:30开始拆解密封封装装置
盖体防尘罩和悬臂支架螺钉拆除

2.2 封装装置解封

(4) 铲取样品容器和钻取样品容器分开



12月22日15:10，取出铲取样品容器

2.3 样品分样存储

1) 钻取样初级密封容器打开及截断；



钻取样软袋按15cm长度截断为十一段

四、月球样品最新研究进展

目前CE-5月球样品已经开展了**基础物性、岩相学、矿物学、化学成分、同位素年代学**的综合分析：

- 建立起CE-5月球样品基本特性的框架；
- 证明CE-5月球样品为一类新的月海玄武岩；
- 填补美国和前苏联月球采样任务的“空白”；
- 改写对月球晚期岩浆演化和火山活动历史的新认识；
- 为后续嫦娥五号样品的持续研究提供基础资料。

ACCEPTED MANUSCRIPT
Characteristics of the lunar samples returned by Chang'E-5 mission
Chen Lijie¹, Hao Hu¹, Meng Fei Yang¹, Zhao Yu Pei, Qian Zhong, Xin Ren, Bin Liu, Dawei Liu, Xingjun Zhang, Guangliang Zhang, Hongbo Zhang, Jianjun Liu, Qing Wang, Xianglin Deng, Caixin Xiao, Yonggang Yao, Dongchao Xue, Wei Zuo, Yao Su, Weibin Wei, Ziyuan Ouyang
Astrophysics Science Review, nrbw188, <https://doi.org/10.1093/astro/abw188>
Published: 14 October 2021

ABSTRACT

Forty-five years after the Apollo and Luna missions returned the lunar samples, China's Chang'E-5 (CE-5) mission returned the Moon's first samples since 1976. 95% of the samples are from the Procellarum KREEP Terrane (PKT), which were also classified as a new type of lunar basalt.

Article

Two billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'E-5 basalts

<https://doi.org/10.1038/s41566-021-04100-3>

Received: 28 July 2021

Accepted: 8 October 2021

Published online: 19 October 2021

Qiu-Li Li¹, Qin Zhou¹, Yu Liu¹, Zhiyong Xiao¹, Yangting Lin¹, Jin-Hua Li¹, Hong-Kai Ma¹, Guo-Qiang Tang¹, Shun-Duo¹, Xu Tang¹, Jieping Fan Yuen¹, Bao Li¹, Fu-Yuan Wu¹, Ziyuan Ouyang¹, Chuntao Li¹ & Xian-Hua Li¹

The Moon has a dramatic and thermal history distinct from those of the terrestrial

Article

Non-KREEP origin for Chang'E-5 basalts in the Procellarum KREEP Terrane

<https://doi.org/10.1038/s41566-021-04100-5>

Received: 28 July 2021

Accepted: 8 October 2021

Published online: 19 October 2021

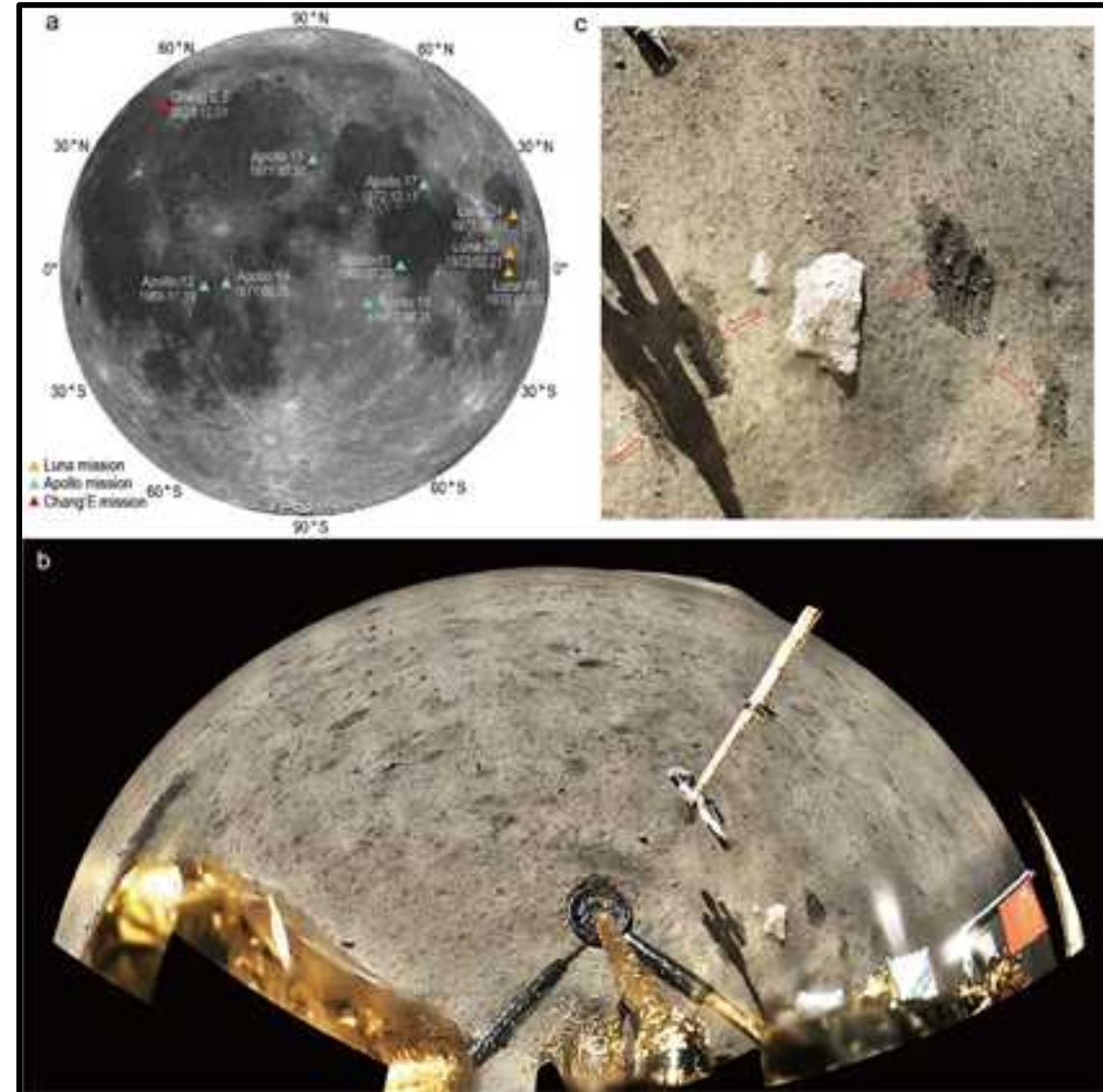
Hong-Gi Tian¹, Hao Wang¹, Yi Chen¹, Wei Yang¹, Qin Zhou¹, Chong Zhang¹, Hong-Lai Lin¹, Chao Huang¹, Shu-Tao Wu¹, Li-Hua Ma¹, Jin Xu¹, Qi Zhang¹, Xiao-Guang Li¹, Rui Cheng¹, Yue-Heng Yang¹, Lie-Wen Xie¹, Dan-Ping Zhang¹, Guang-Liang Zhang¹, Bai-Hong Yang¹ & Fu-Yuan Wu¹

Mare volcanics on the Moon are the key record of thermo-chemical evolution throughout most of lunar history¹⁻⁵. Young mare basalts, mainly distributed in a region rich in potassium, rare earth elements, and phosphorus (KREEP) in Oceanus Procellarum called the Procellarum KREEP Terrane (PKT), were thought to be formed from KREEP-rich sources at depth⁶⁻⁸. However, this hypothesis has never been tested with young basalts from the PKT. Here we present a petrological and geochemical study of the basalt clasts from the PKT returned by the Chang'E-5 mission⁹. These 2-billion-year-old basalts are the youngest lunar samples found so far. Bulk rock compositions have moderate TiO₂, high FeO, and KREEP-like rare earth element (REE) and Th concentrations. However, Sr-Nd isotopes both indicate that these basalts were derived from a non-KREEP mantle source. To produce the high abundances of REE and Th, low-degree partial melting and extensive fractional crystallization are required.

四、月球样品最新研究进展

4.1 地质背景：

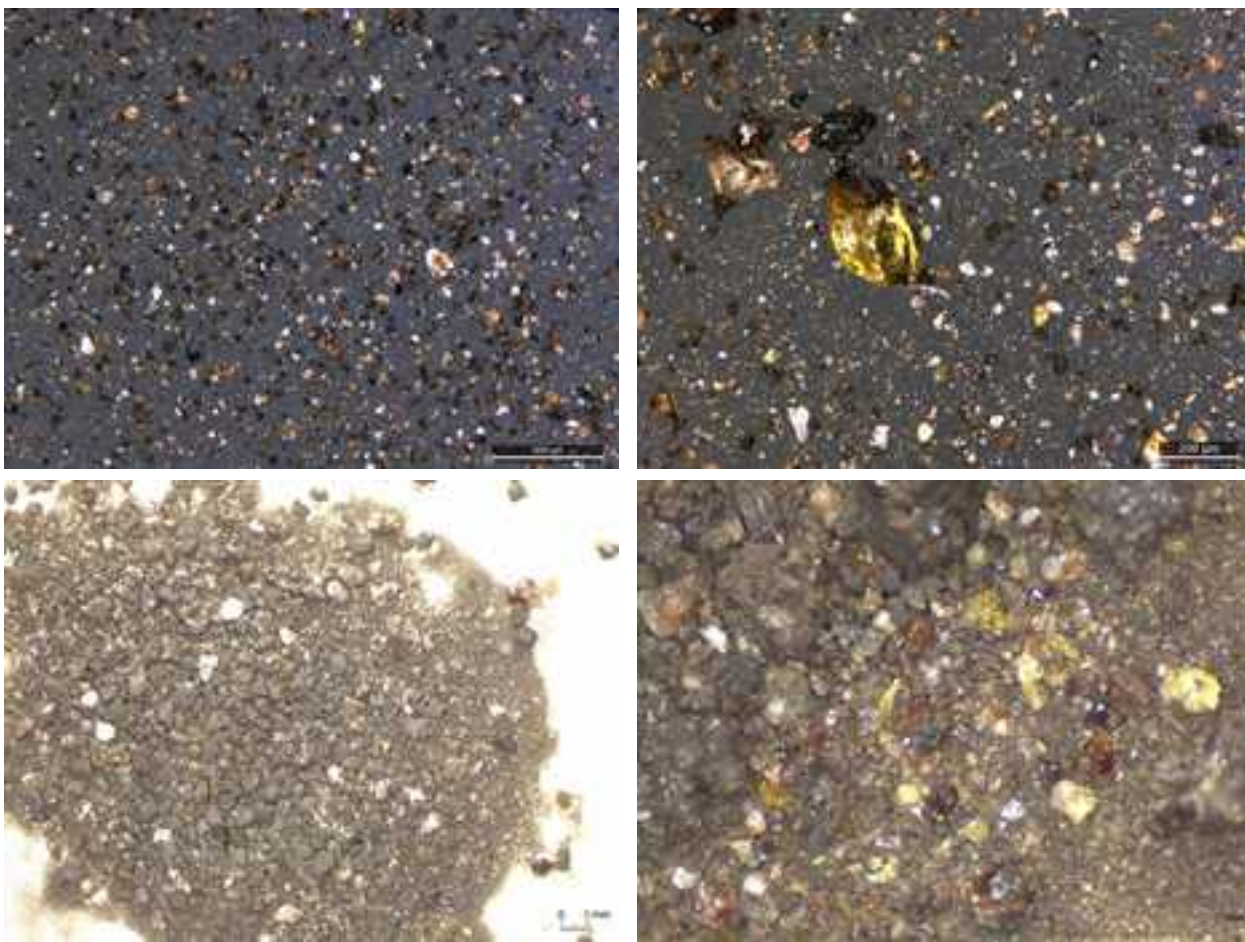
- 6次Apollo和3次Luna采样点均集中在月球南北纬30度之内，无法对如此大且不均一的月面区域充分采样。
- CE-5着陆区位是人类此前从未“踏足”过的月球中纬度地区（ 51.916°W , 43.058°N ），采集新的月球样品弥补了月面采样区域的不足，拓展了月球样品的代表性。
- CE-5采样点附近的月壤呈灰黑色，其中铲取样由3个采样点的12次采集样品构成，每一次采样的深度不超过3cm。



3.1 月壤粉末图像



月壤整体呈灰黑色，粒度较细，偶尔有小的岩石碎屑出现



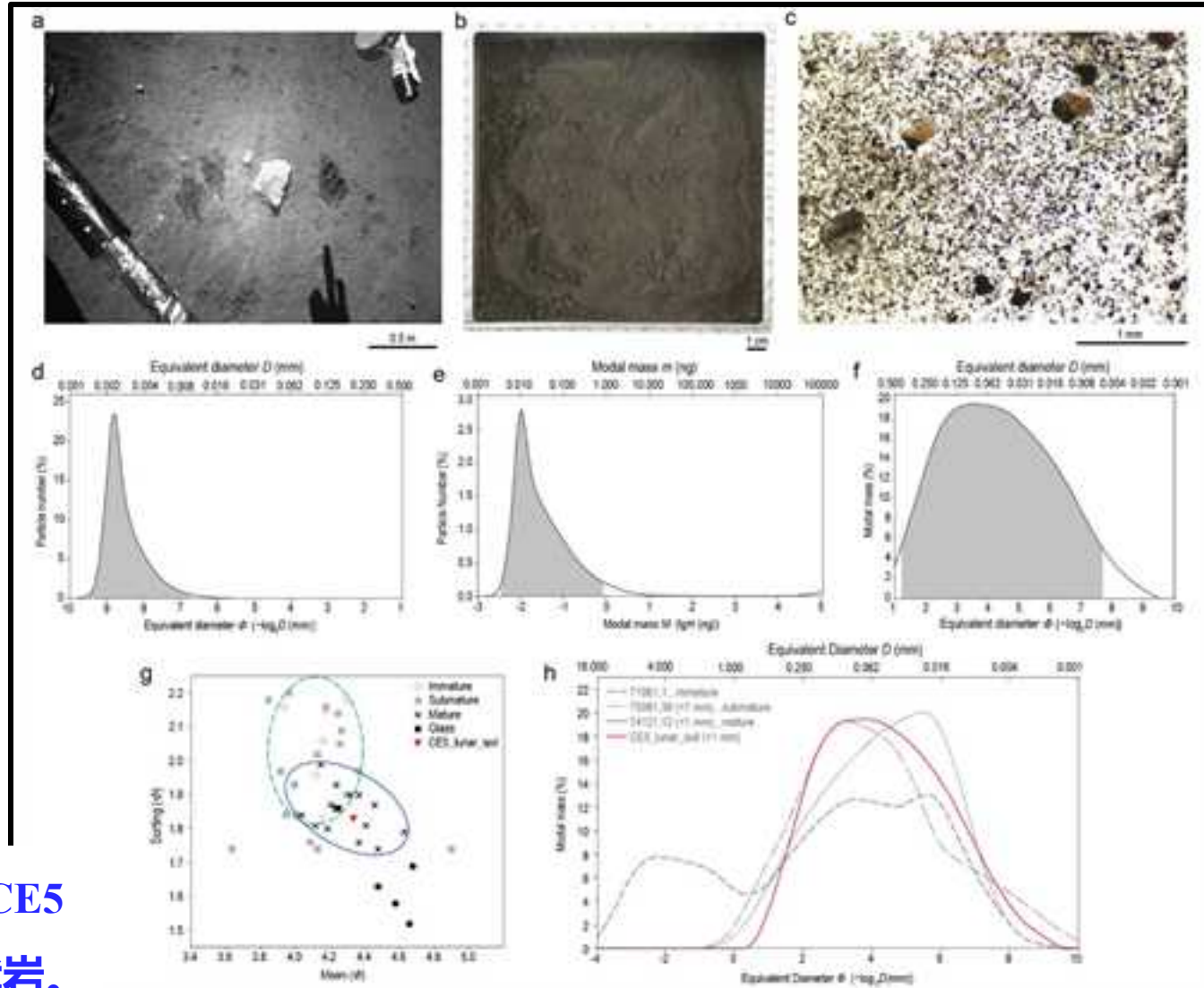
月壤粉末反/透射照片

四、月球样品最新研究进展

4.2 基础物性特征：

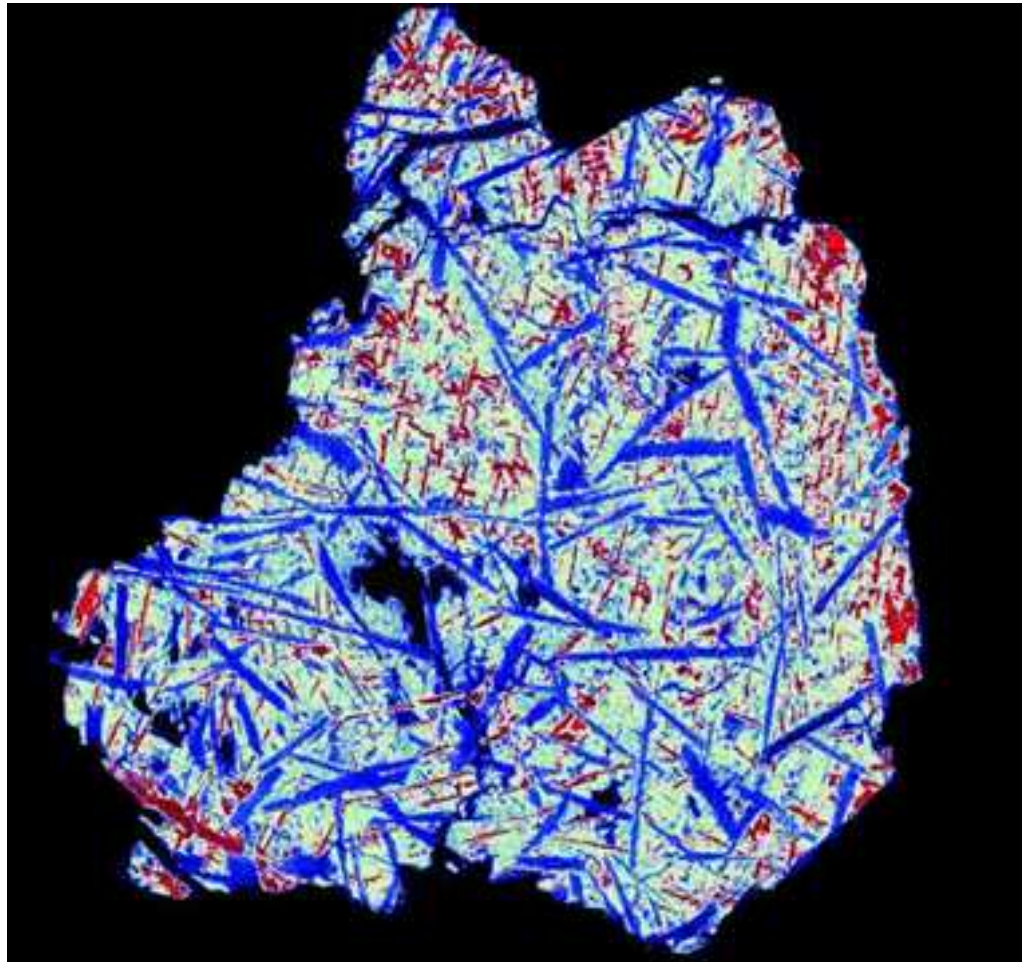
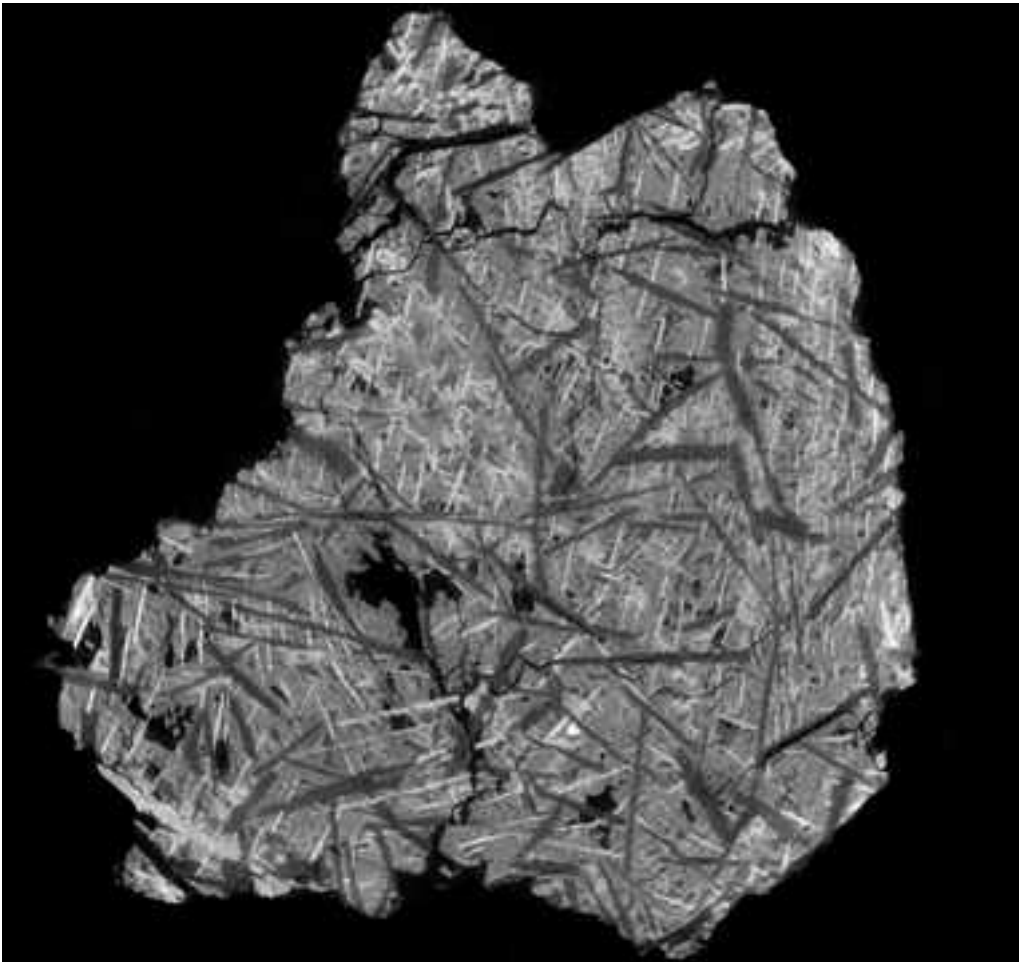
- ❑ 铲取样整体为灰黑色，重量约1480g；
- ❑ 显微镜下矿物颜色丰富，如黄绿色橄榄石，白色长石，棕黑色辉石，褐色玻璃等；
- ❑ 95%颗粒粒径 1.40~9.35 μm (均值3.96 μm), 占质量95%颗粒的粒径 4.8~432 μm (均值49.8 μm);
- ❑ 月球样品很疏松，堆积密度仅约1.24 g/cm^3 ，真密度可达3.20 g/cm^3 ，比表面积为0.56 m^2/g ；

基础物性参数与Apollo和Luna样品变化范围一致，但CE5月壤的粒度更细，分选更好，真密度略微低于月海玄武岩。



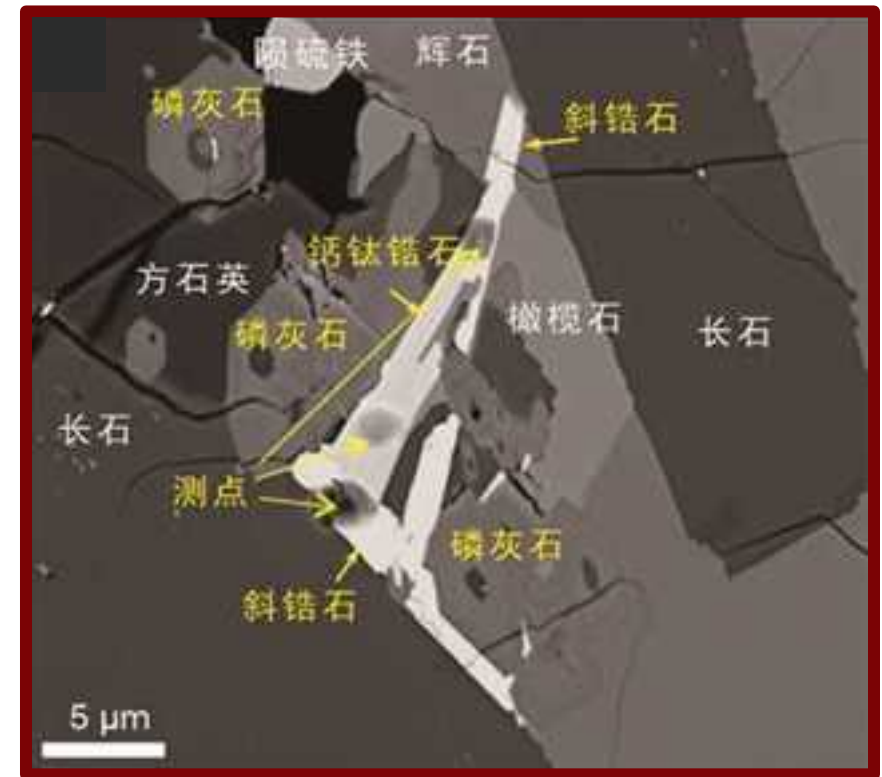
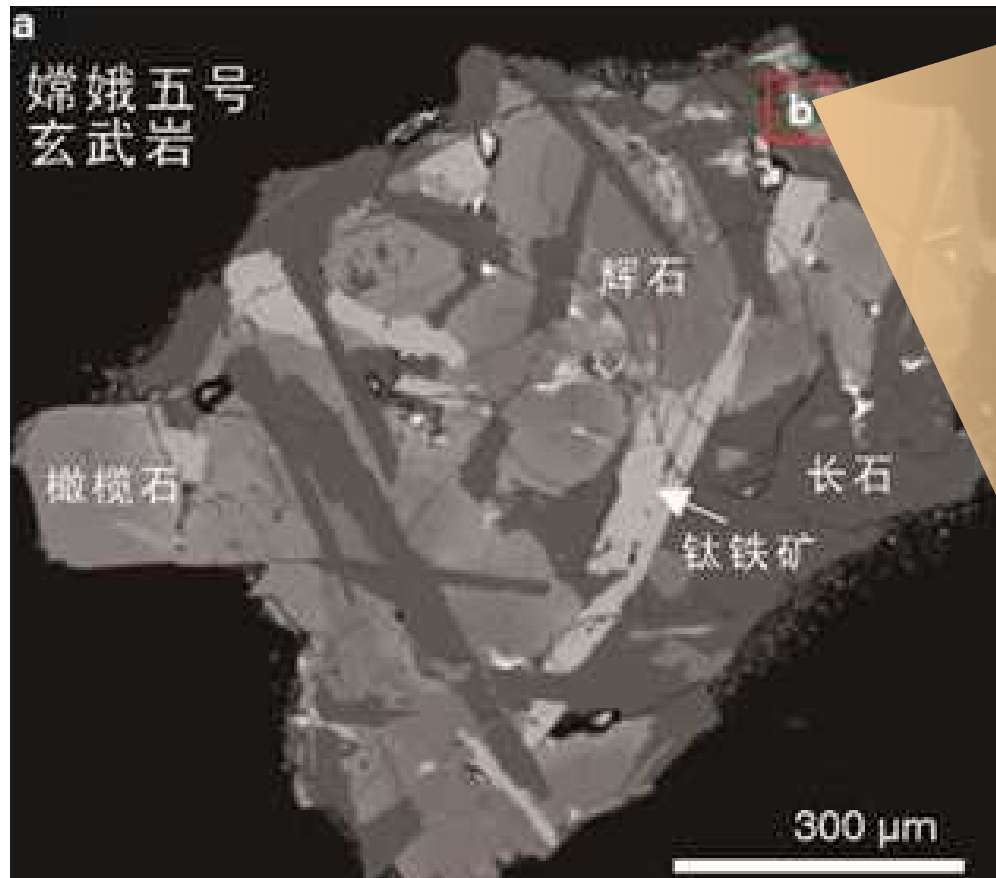
4.3 矿物学特征：

3.2 岩石颗粒图像特征



- 红色：钛铁矿；
- 绿色：辉石；
- 黄绿色：橄榄石；
- 蓝色：斜长石；

4.6 玄武岩岩屑的原位U-Pb同位素定年



对不同结构的玄武岩屑开展U-Pb同位素定年

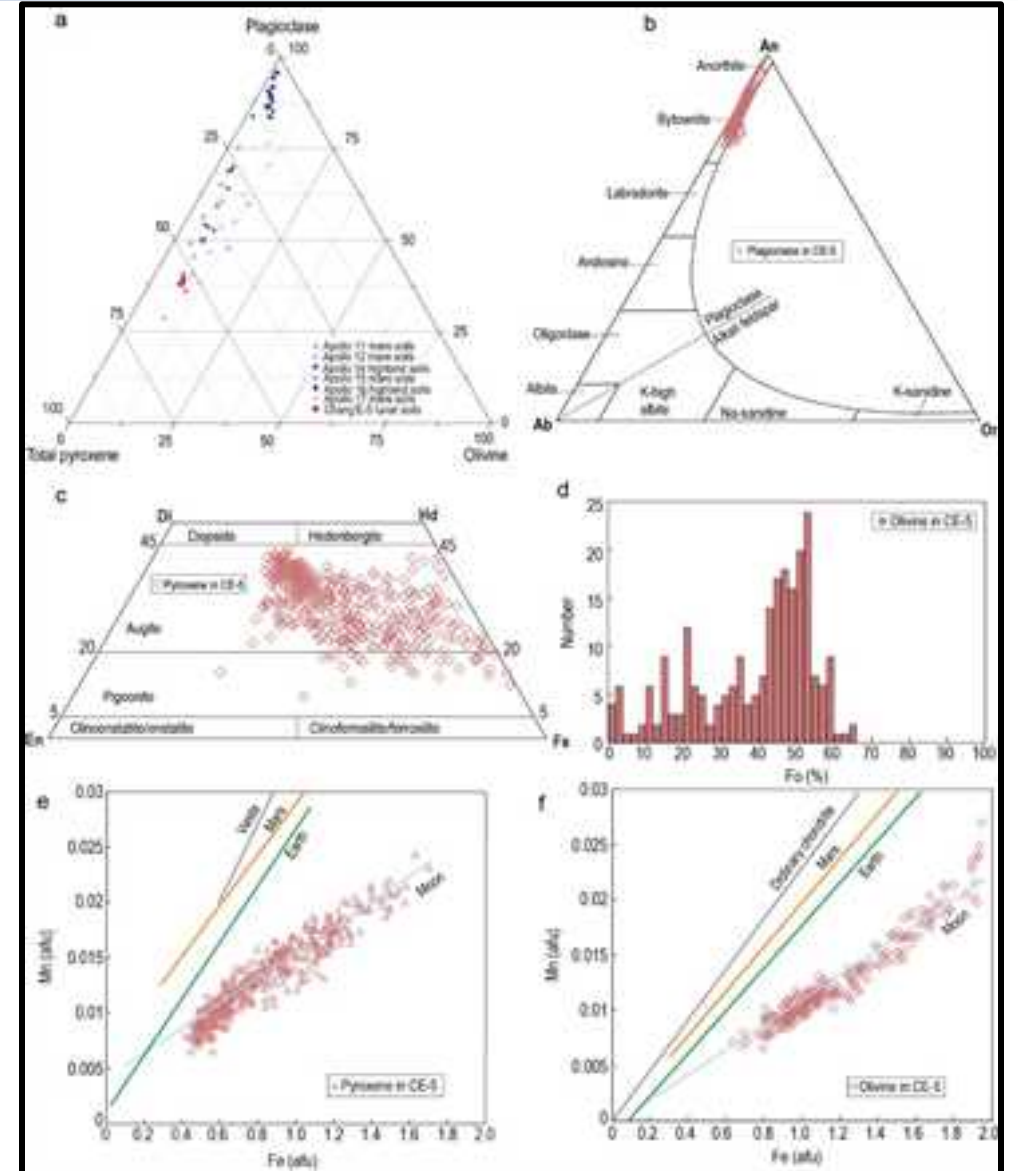
四、月球样品最新研究进展

4.3 矿物学特征：

□ 辉石含量较高，其次是斜长石，钛铁矿和橄榄石含量较少；

□ 辉石以普通辉石为主，橄榄石主要是富铁橄榄石；

月壤主要矿物组成与典型的月海玄武岩一致

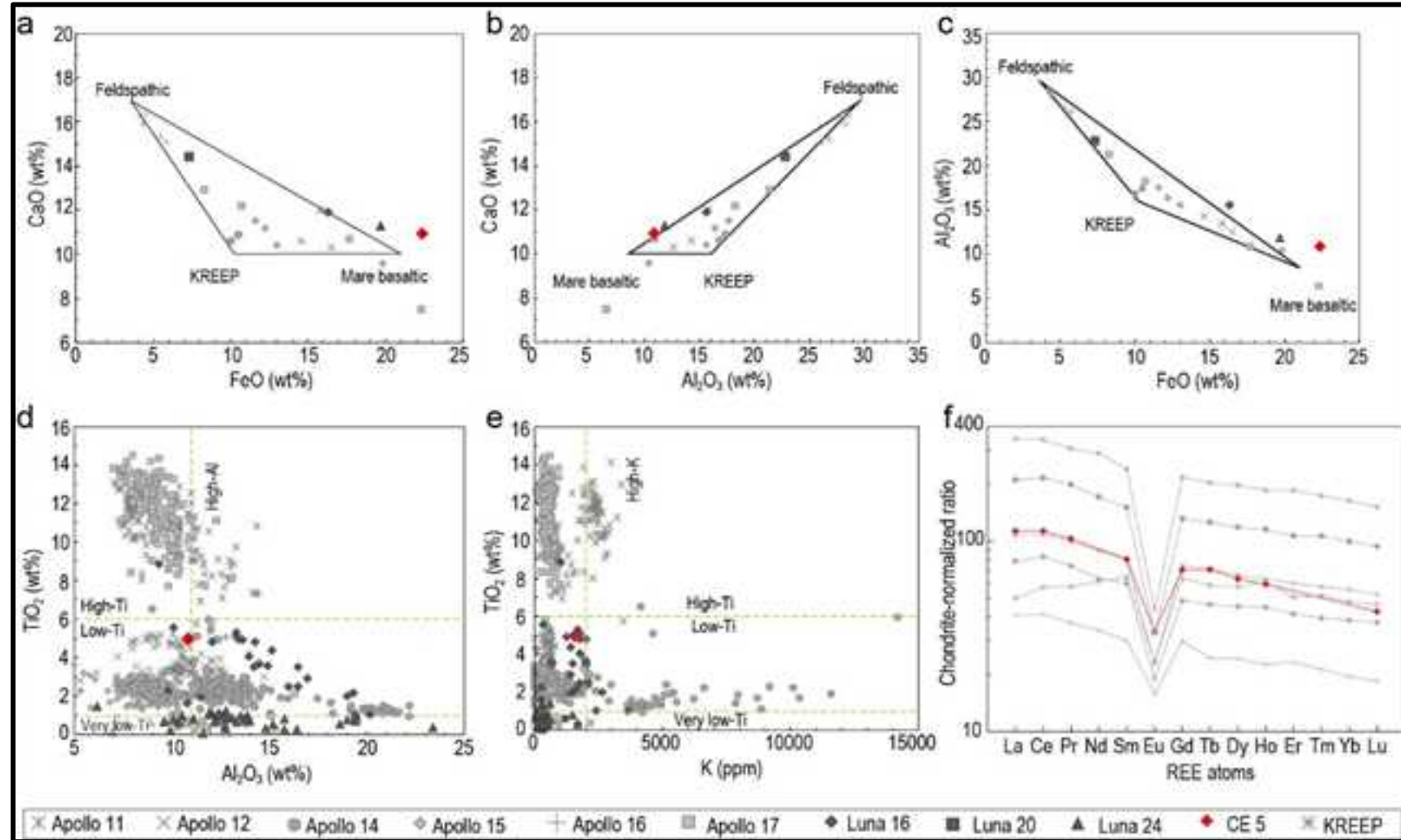


四、月球样品最新研究进展

4.4 化学成分：

□ CE-5月壤样品 SiO_2 和碱性元素含量较低， TiO_2 和 Al_2O_3 中等，FeO含量高，属于低钛/低铝/低钾的月海玄武岩类型；

□ K、U、Th和REE含量均低于KREEP物质。



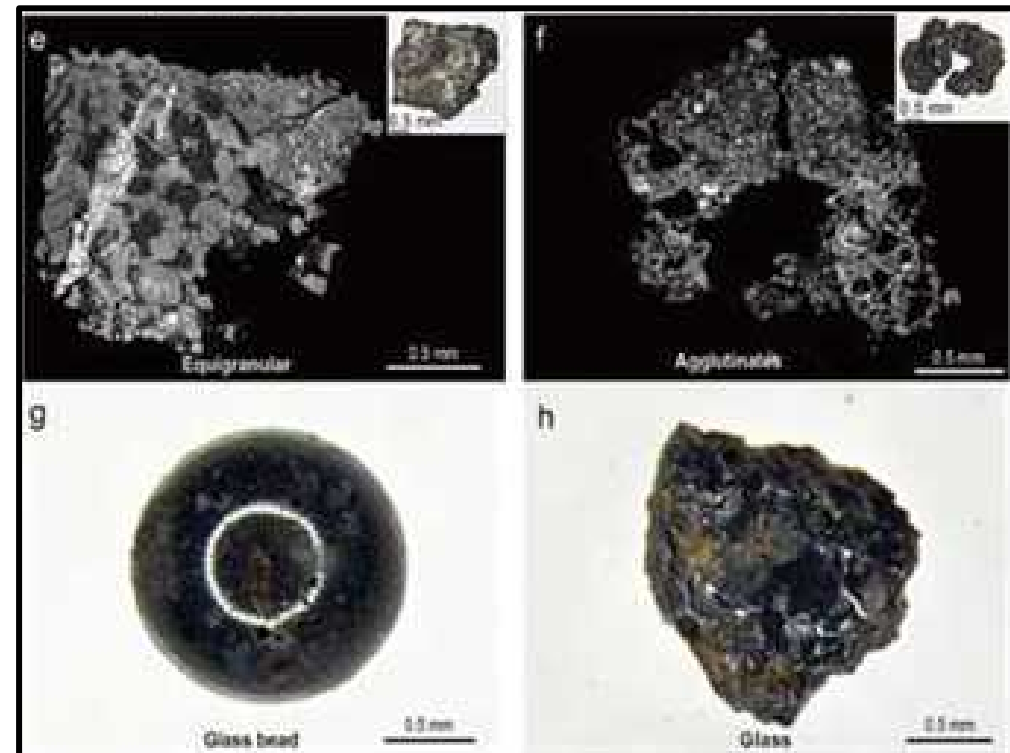
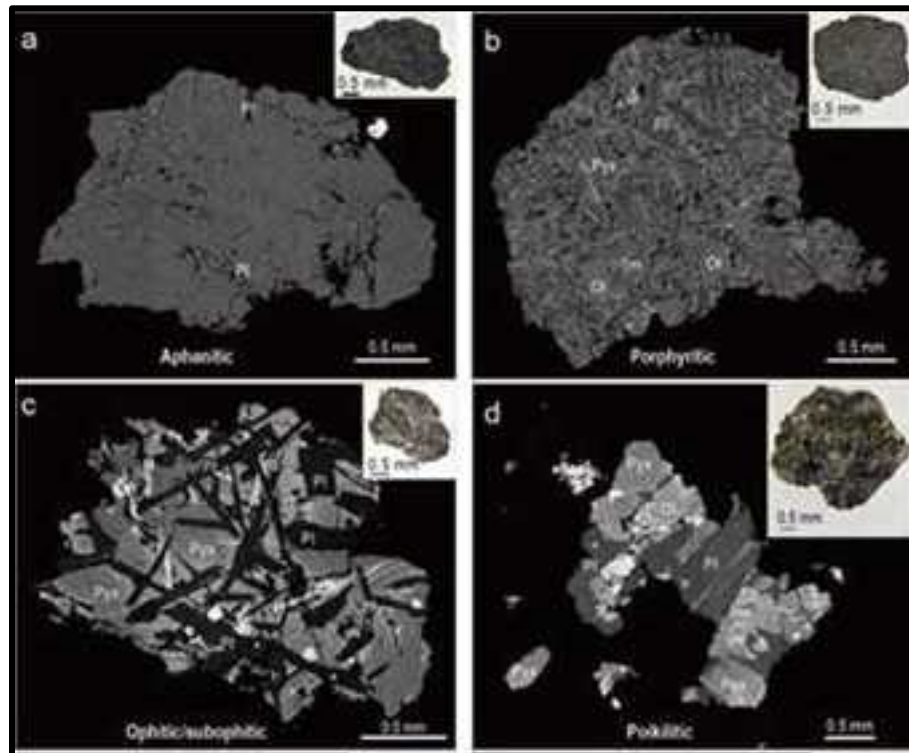
与Apollo和Luna样品相比，CE-5代表一类新的高度演化的玄武岩类型（富Fe，低Mg#）

四、月球样品最新研究进展

4.5 岩相学观察

CE-5样品中小岩屑 ($>1\text{mm}$) 包括：

- 玄武质岩屑（5种结构类型）；
- 凝结核块岩；
- 玻璃；
- 少量角砾岩出现。

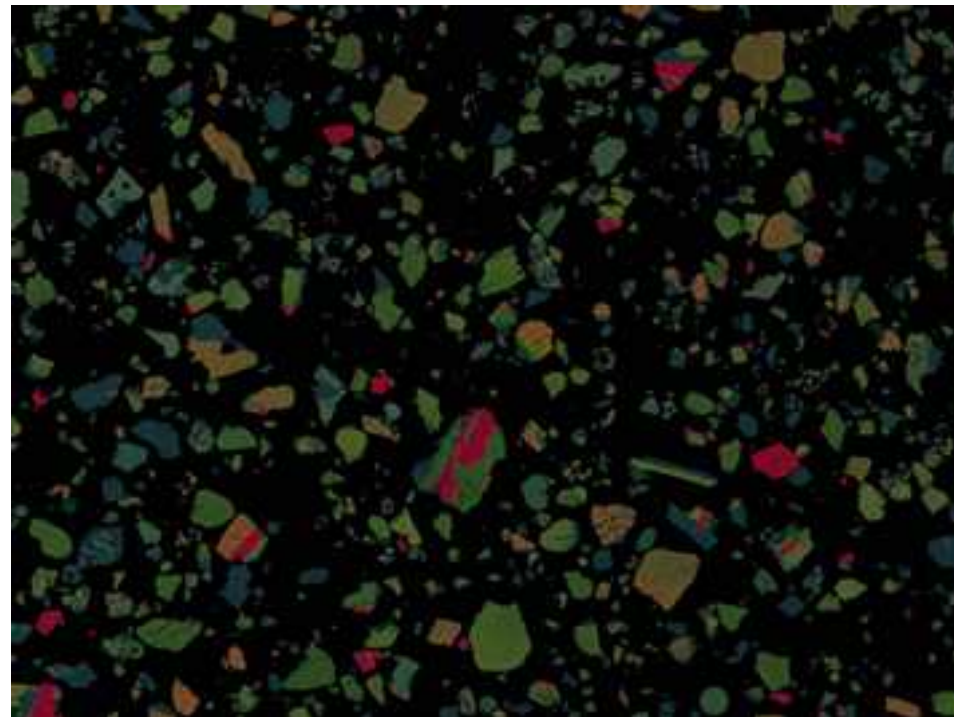


三、月球样品形貌特征

3.1 月壤粉末图像



月壤粉末制备成光片

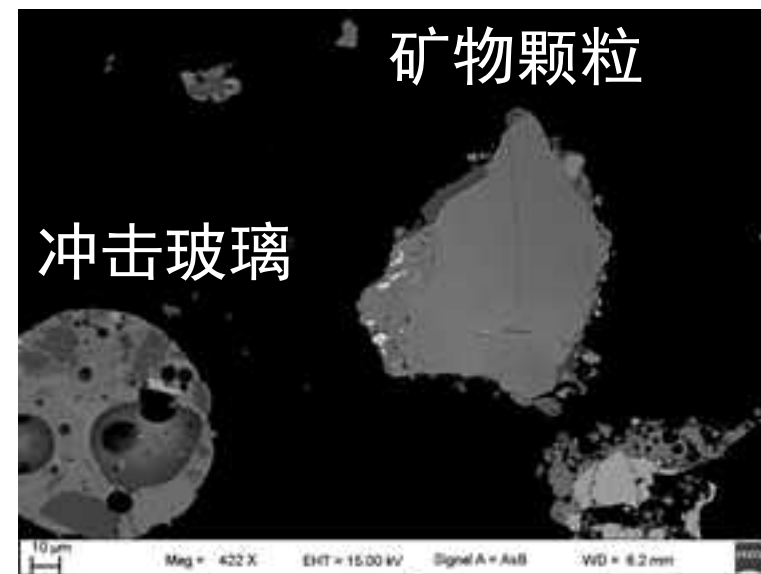
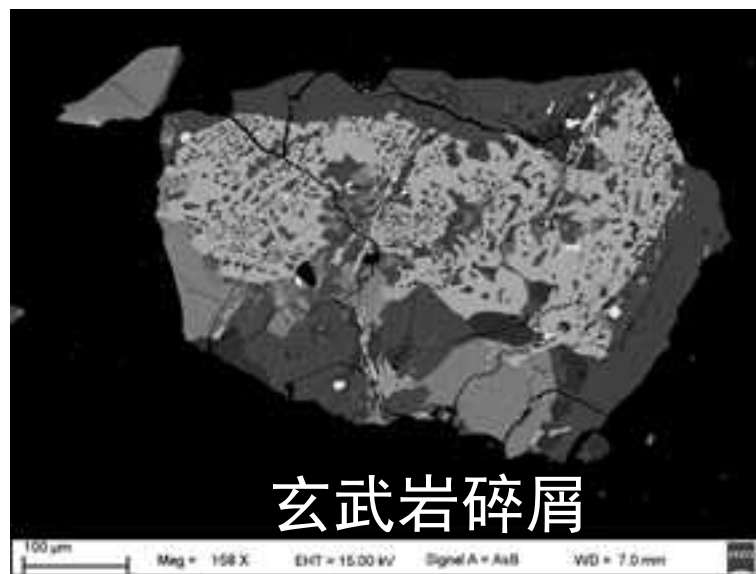
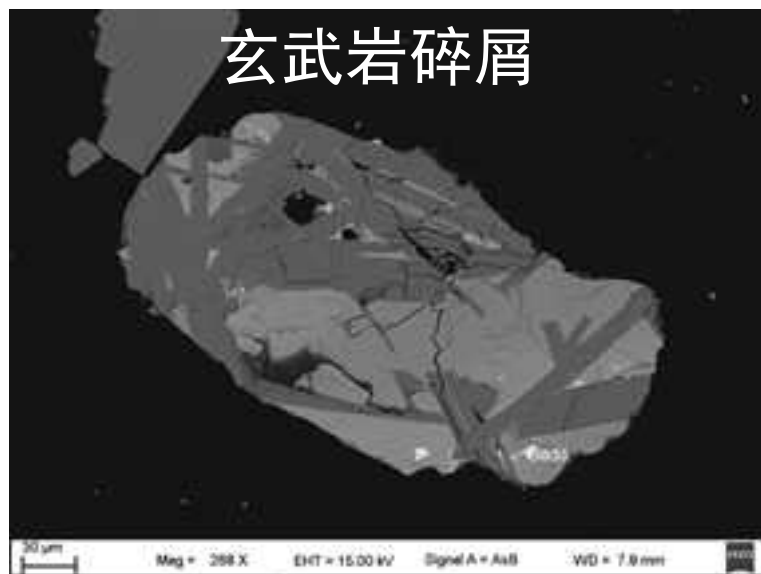


光片局部元素能谱照片

- 红色：钛铁矿；
- 绿色：辉石；
- 黄绿色：橄榄石；
- 蓝色：斜长石；

三、月球样品形貌特征

3.1 月壤粉末图像特征

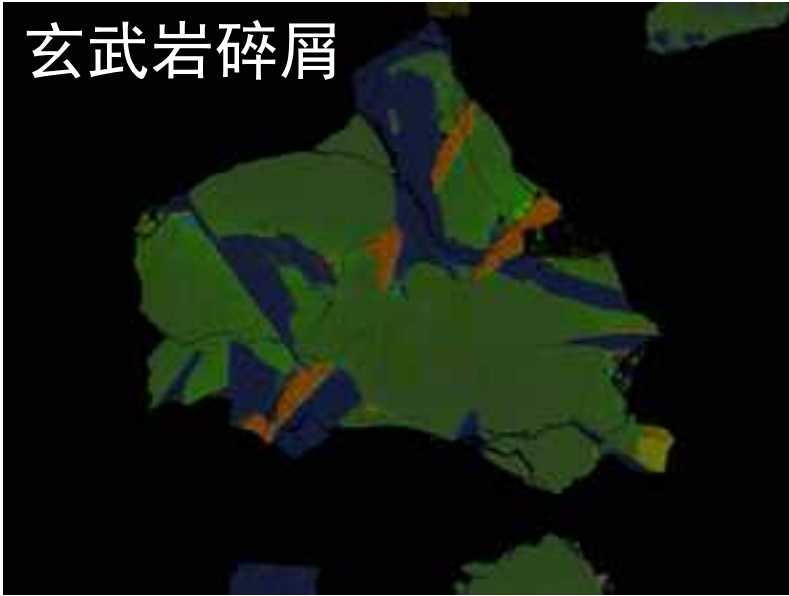


月壤粉末光片的典型背散射照片

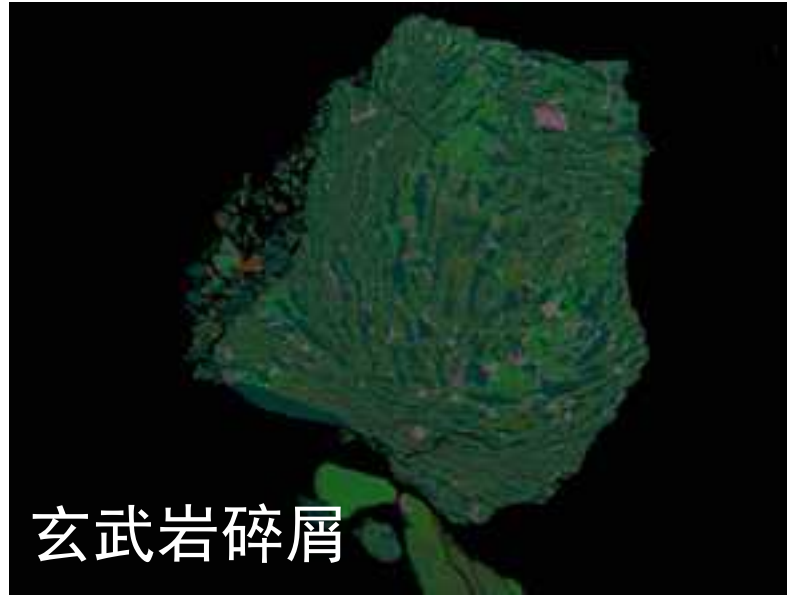
三、月球样品形貌特征

3.1 月壤粉末图像特征

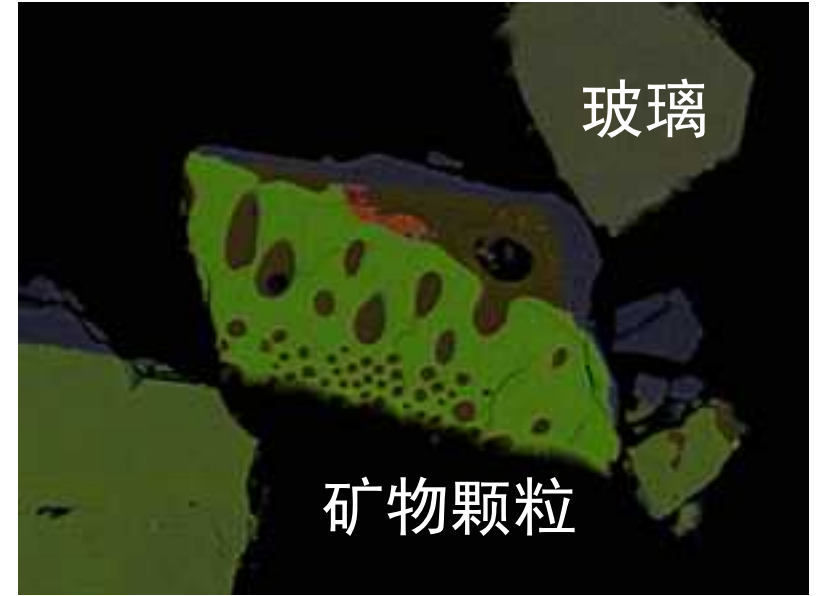
玄武岩碎屑



玄武岩碎屑



玻璃

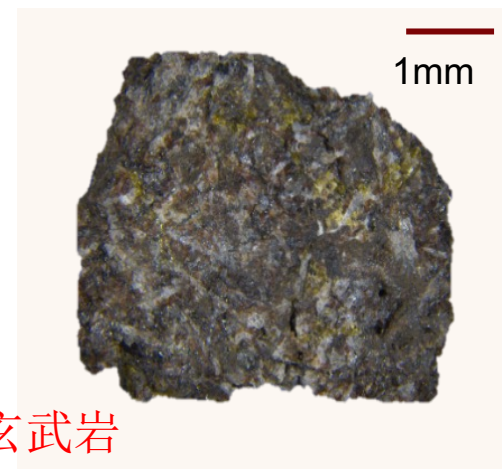
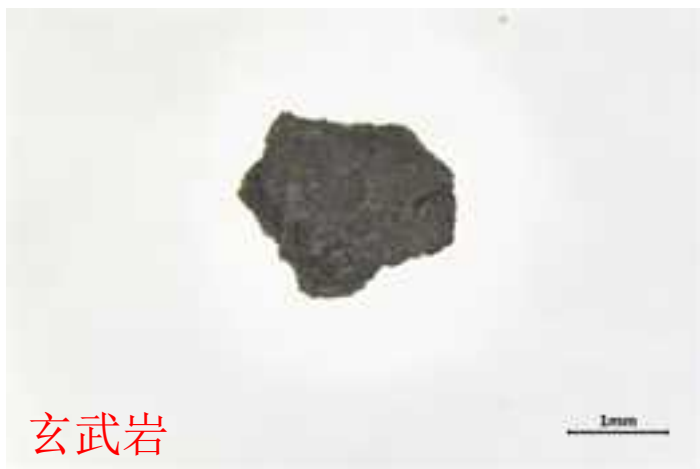
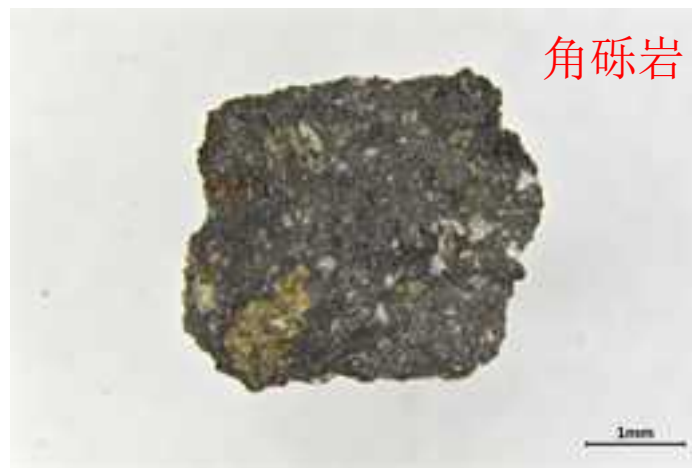


矿物颗粒

月壤粉末光片的典型能谱照片

三、月球样品形貌特征

3.2岩石颗粒图像



三、月球样品形貌特征

3.2岩石颗粒图像



三、月球样品形貌特征

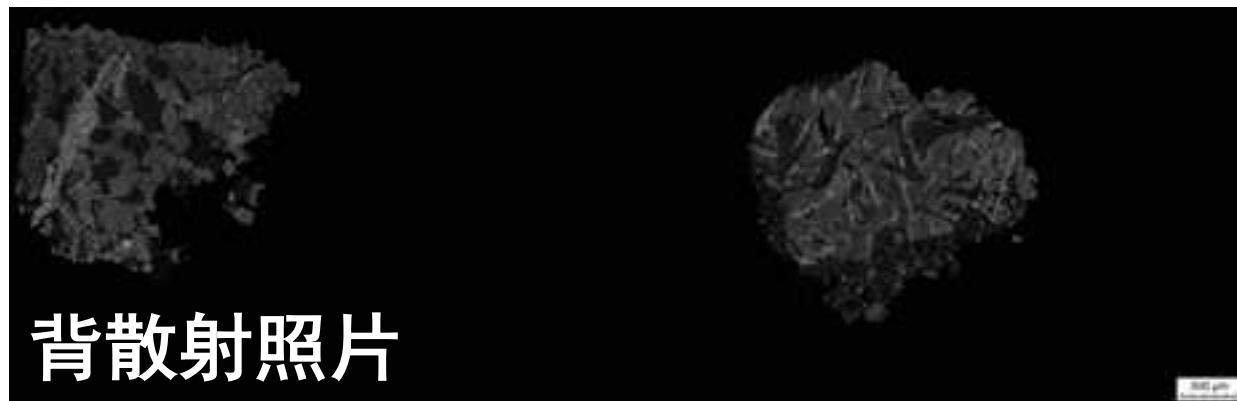
3.2 岩石颗粒图像特征



岩屑颗粒制备成光片



反射光照片

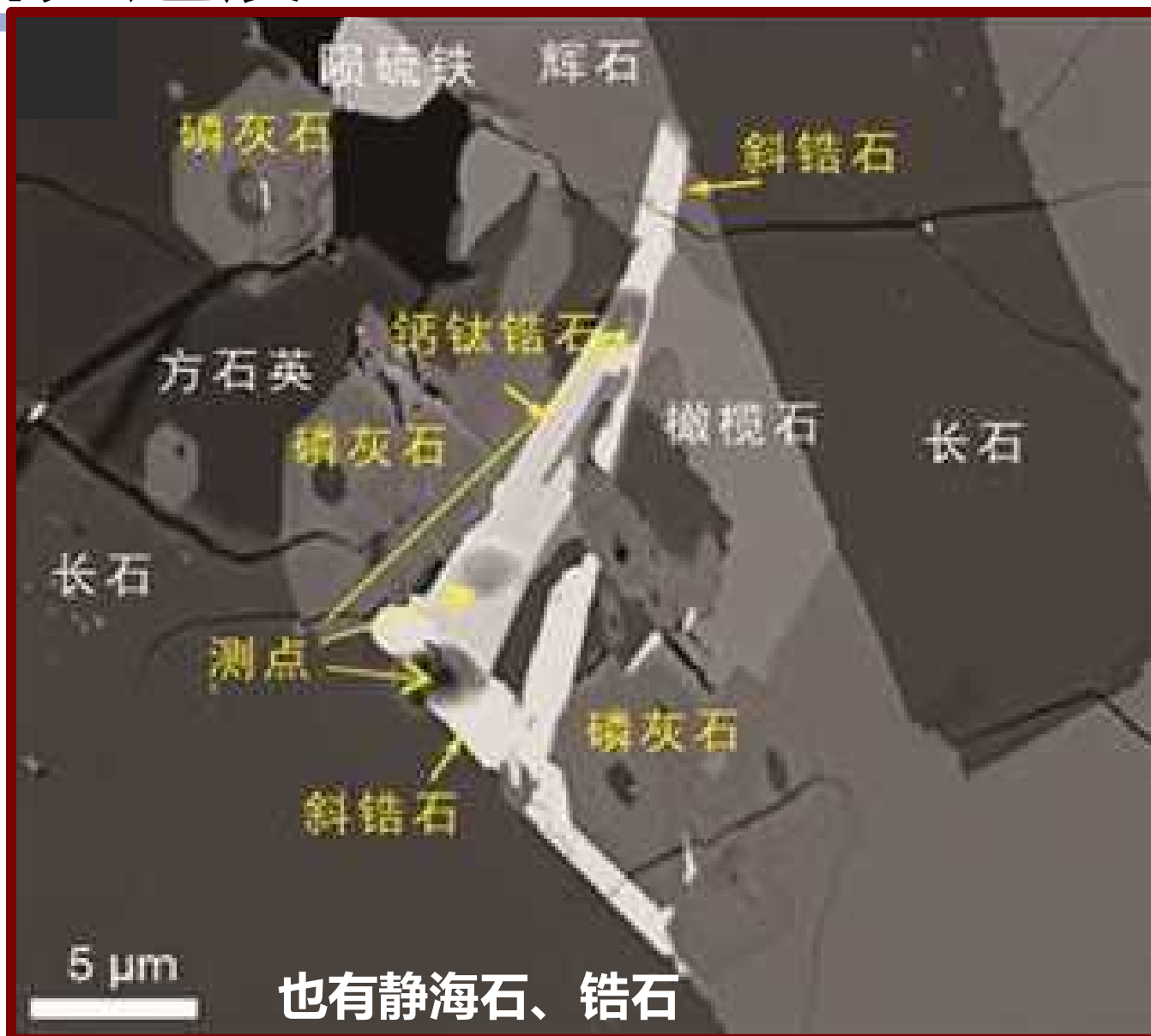


背散射照片

玄武岩岩屑

四、月球样品最新研究进展

4.6 玄武岩岩屑的原位U-Pb同位素定年

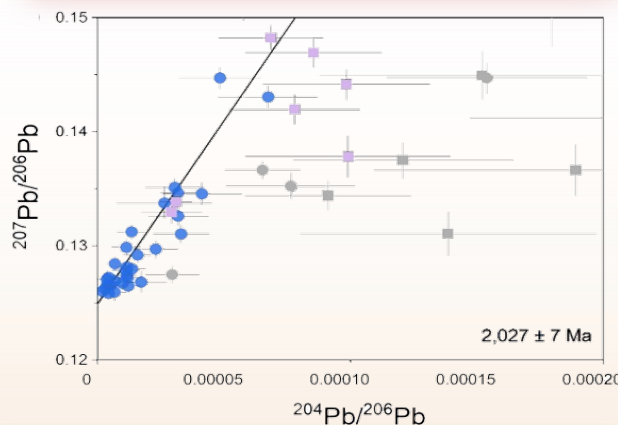


四、月球样品最新研究进展

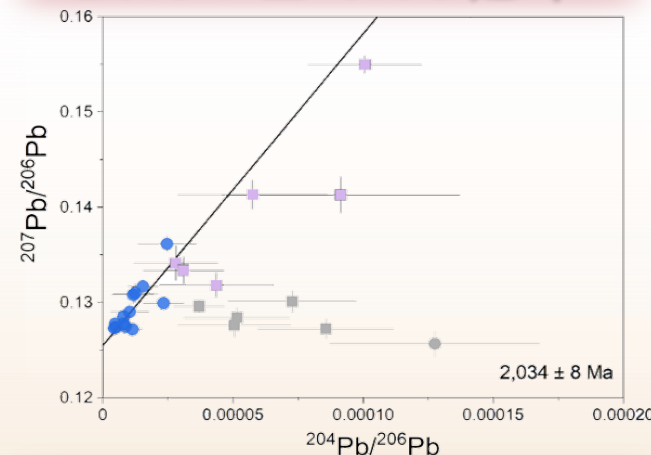
4.6 玄武岩岩屑的原位U-Pb同位素定年

四种类型，相同年龄

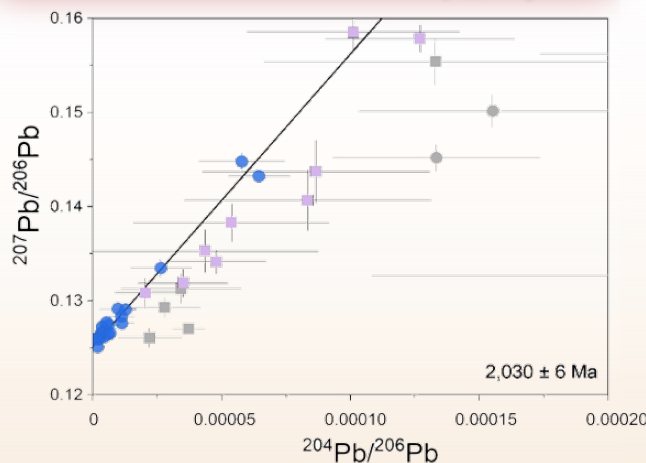
20.27 ± 0.07 亿年



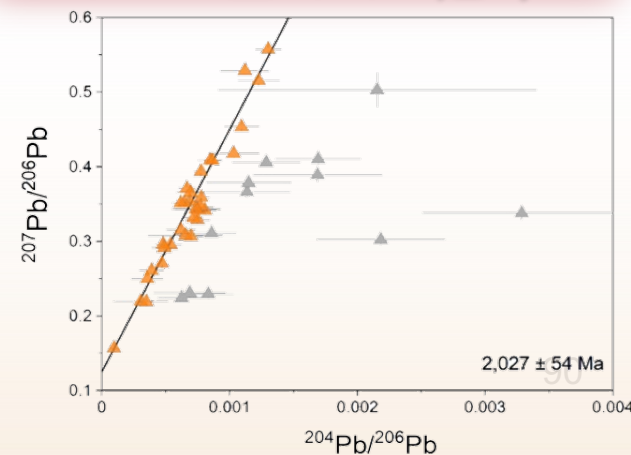
20.34 ± 0.08 亿年



20.30 ± 0.06 亿年



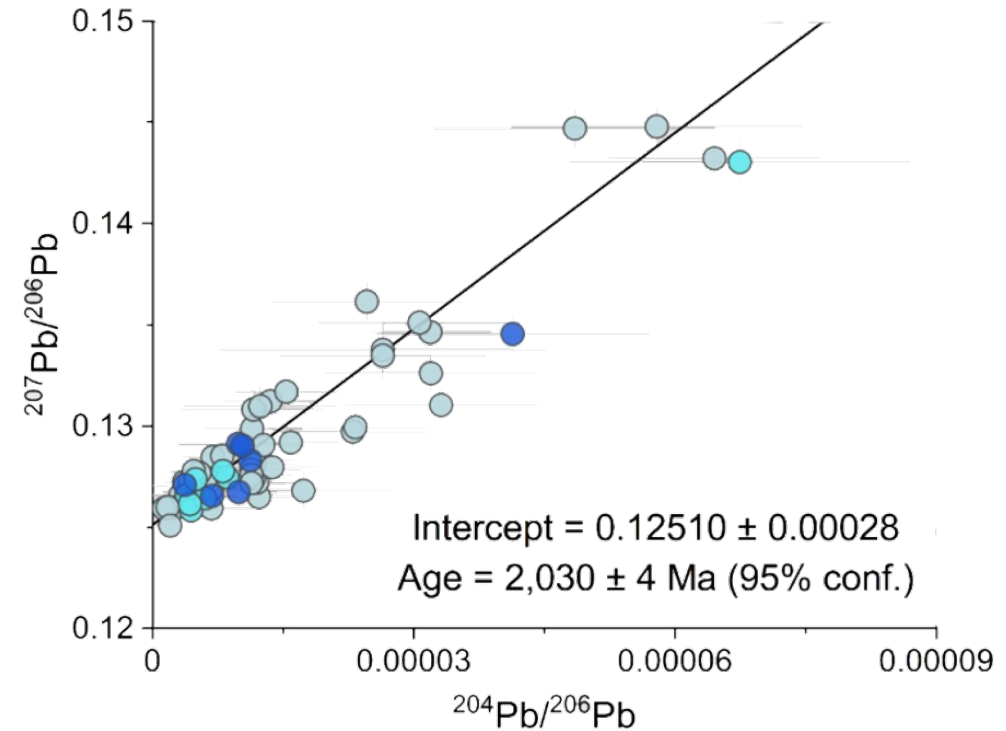
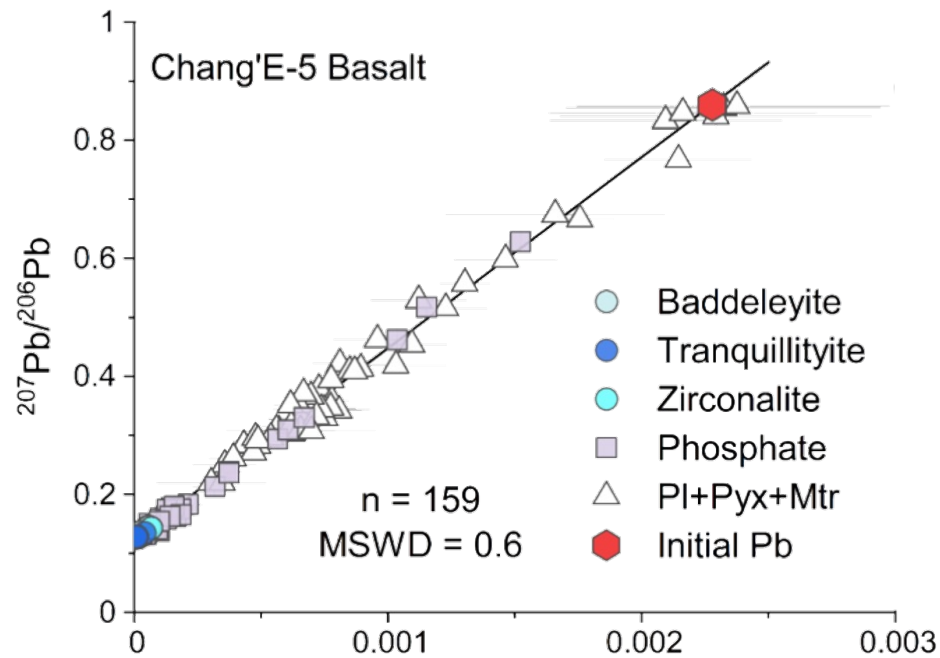
20.27 ± 0.54 亿年



CE-5玄武岩均来自同一次喷发

四、月球样品最新研究进展

4.6 玄武岩岩屑的原位U-Pb同位素定年

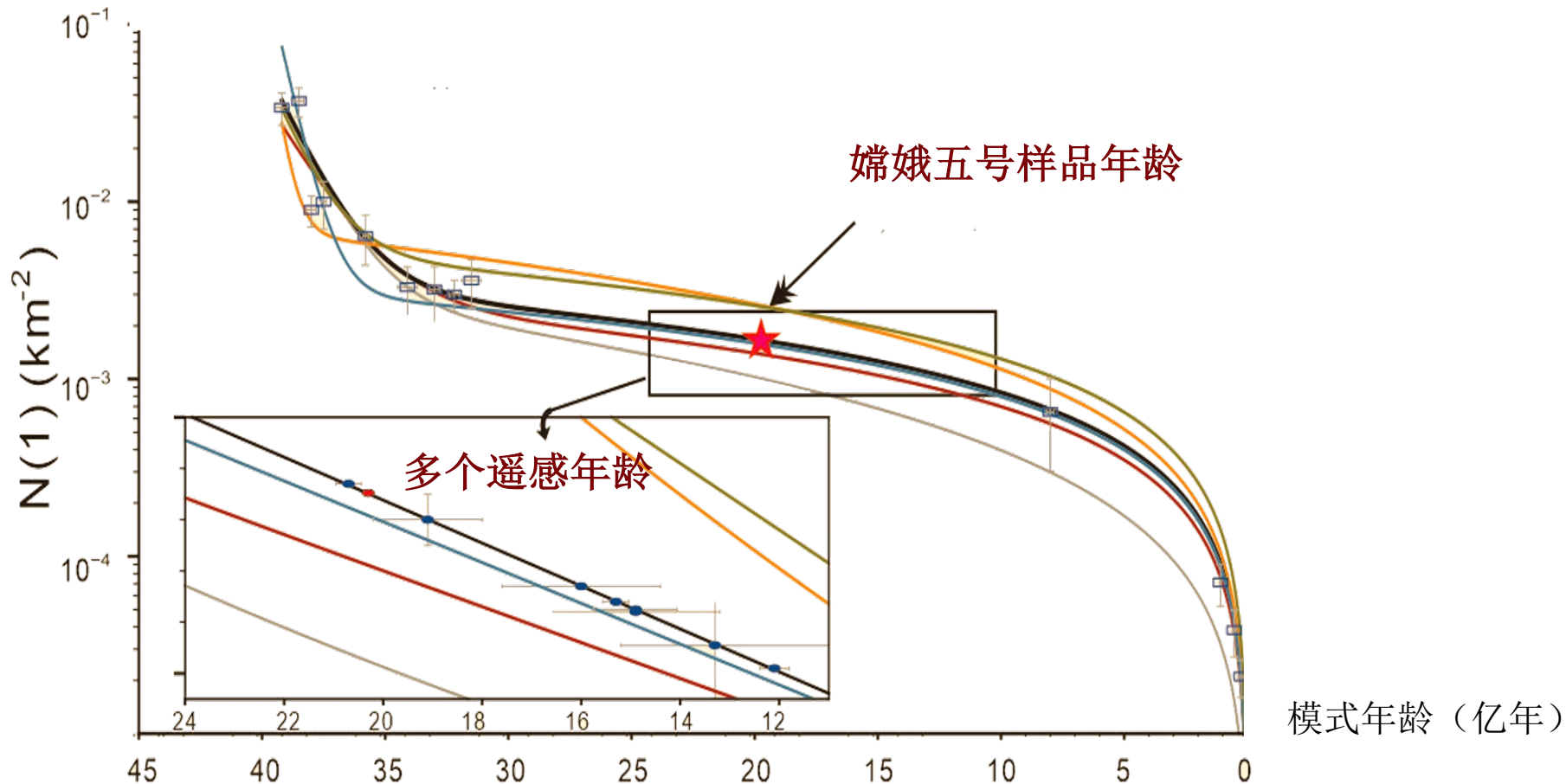


嫦娥五号玄武岩于 **20.30 ± 0.04** 亿年前喷发

将月球的火山活动结束时间推迟了**8~9**亿年

四、月球样品最新研究进展

4.6 玄武岩岩屑的原位U-Pb同位素定年

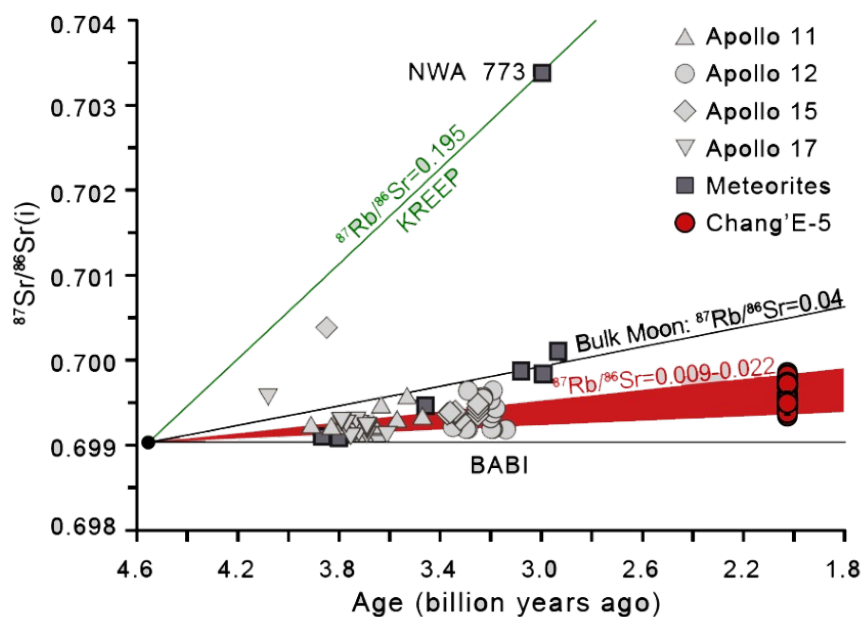


为撞击坑统计定年曲线提供关键锚点

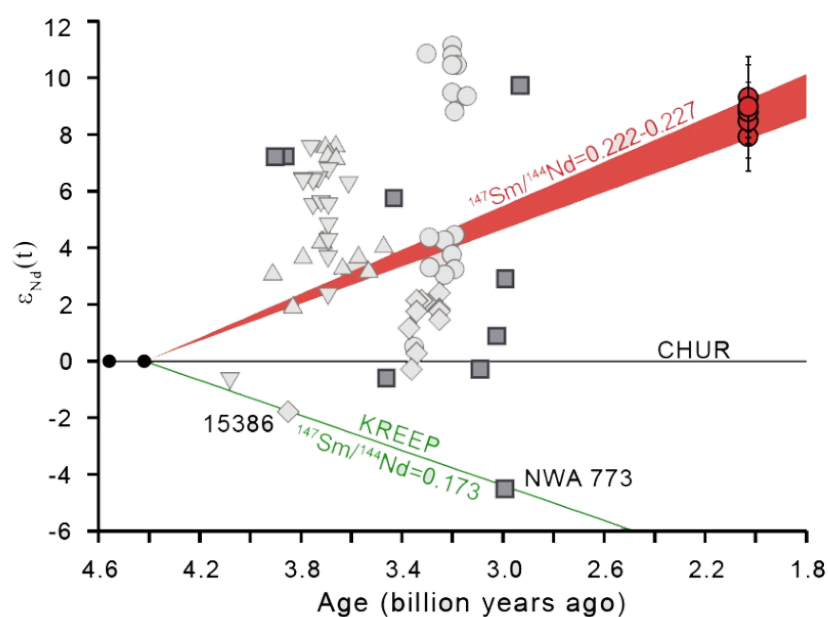
四、月球样品最新研究进展

4.7 玄武岩的源区特征

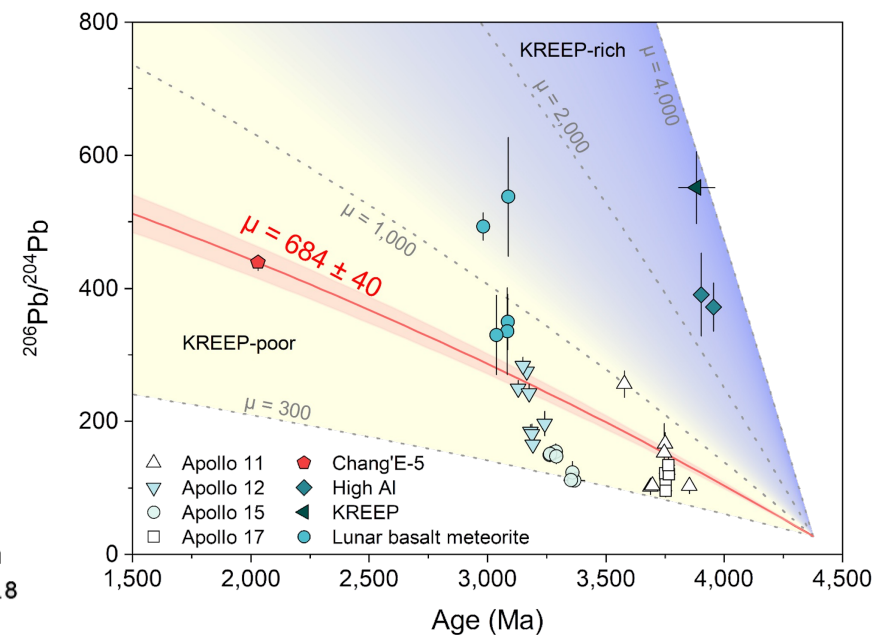
锶 (Sr) 同位素



钕 (Nd) 同位素



铅 (Pb) 同位素



CE-5玄武岩明显不同于克里普，源区并不富含放射性生热元素

四、月球样品最新研究进展

月球的火山活动为什么持续如此之久？

升温（深部热源）



源区生热元素含量（Th） X

加水或挥发分（降低熔点）



源区水（挥发分）含量 X

降压（减压熔融）



反演岩浆起源压力 ...

目前的研究成果对月球热演化历史研究提出了新的科学问题

需要重建新的理论框架和演化模型



行星科学是地球科学的延伸和扩展



行星科学是地球科学的延伸和扩展

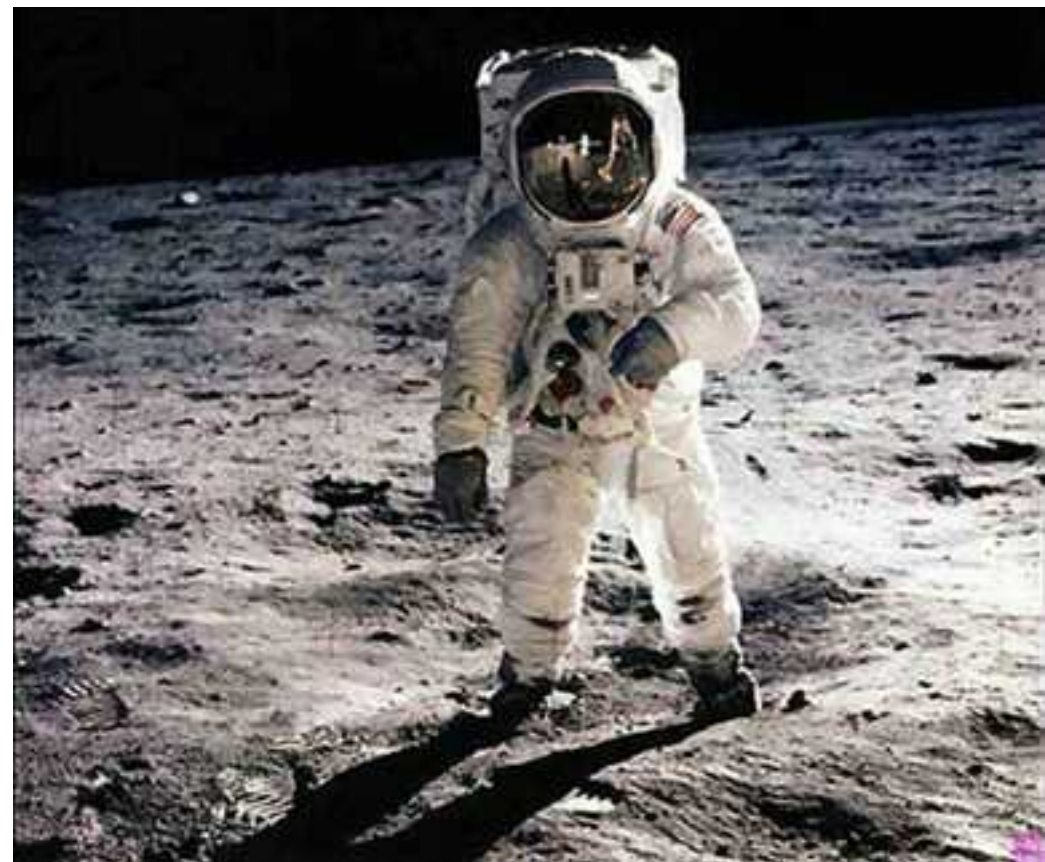
过去，科学家只有一颗行星——地球，进行详细研究。受到技术的限制，我们从来没有出过远门，没有离开过方圆几十公里的村庄。随着有了汽车、火车、飞机，我们可以到达地球的每一个角落，形成地球科学的方法、理论和认识。

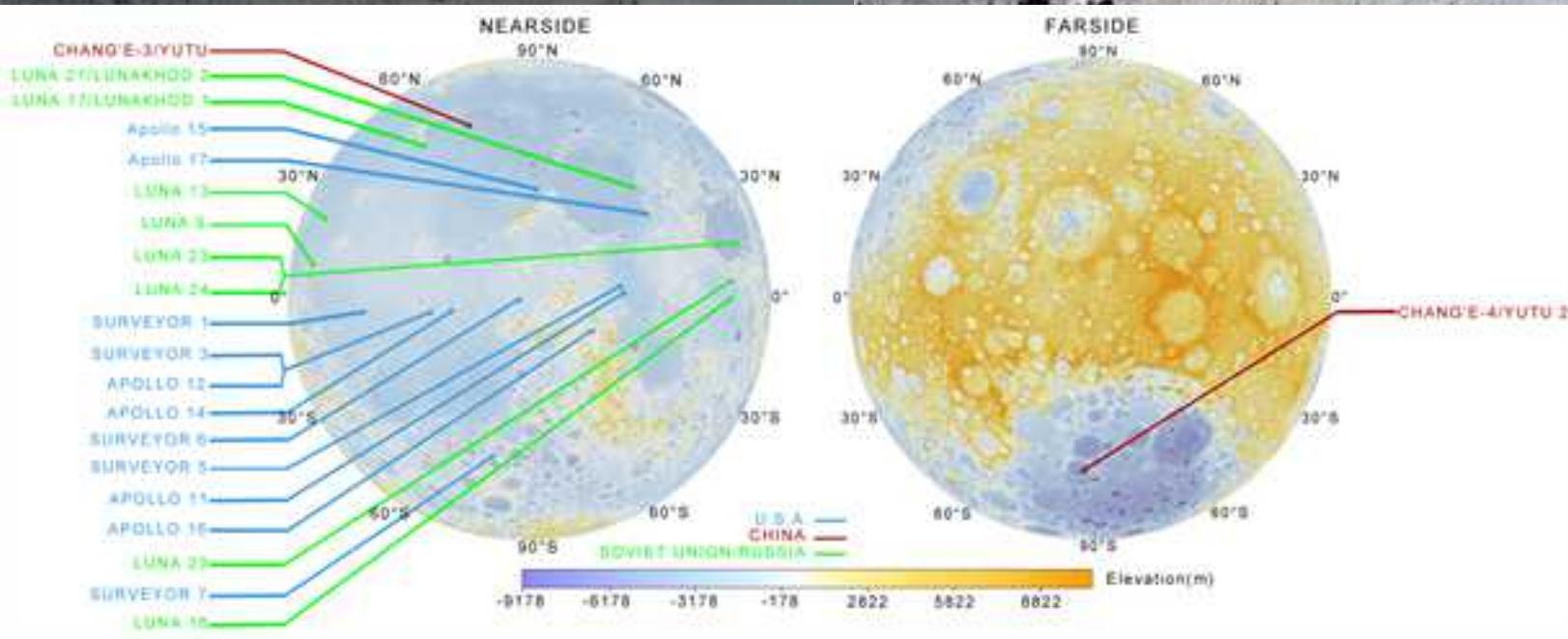
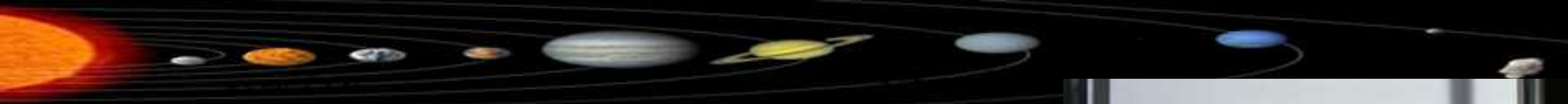
航天技术的出现，遥感技术和探测仪器的发展，我们走出了地球（尽管还非常近），眼光和触角“摸”到了陌生的世界，

但我们仍然是将我们在地球上的经验，将地球科学的知识、理论和方法应用到月球、火星、金星、水星、小行星、木星系，整个太阳系，甚至其他恒星周围的数百个世界。

我们的地球是目前唯一一个生命存在和繁衍的地方，是一个复杂的大气、水圈、岩石圈和生物圈交织系统。通过研究行星的性质和过程，在不同的环境中，其中有些比地球简单得多，但有些展现出了非常明显的不一样。行星科学的研究，可以获得很多不同的样本，从不同的视角、不同的历史阶段获得行星（包括地球）演化的知识。

地球科学是行星科学的起始和出发点——以月球和火星为例。







行星科学起始于地球科学，是地球科学的延伸。

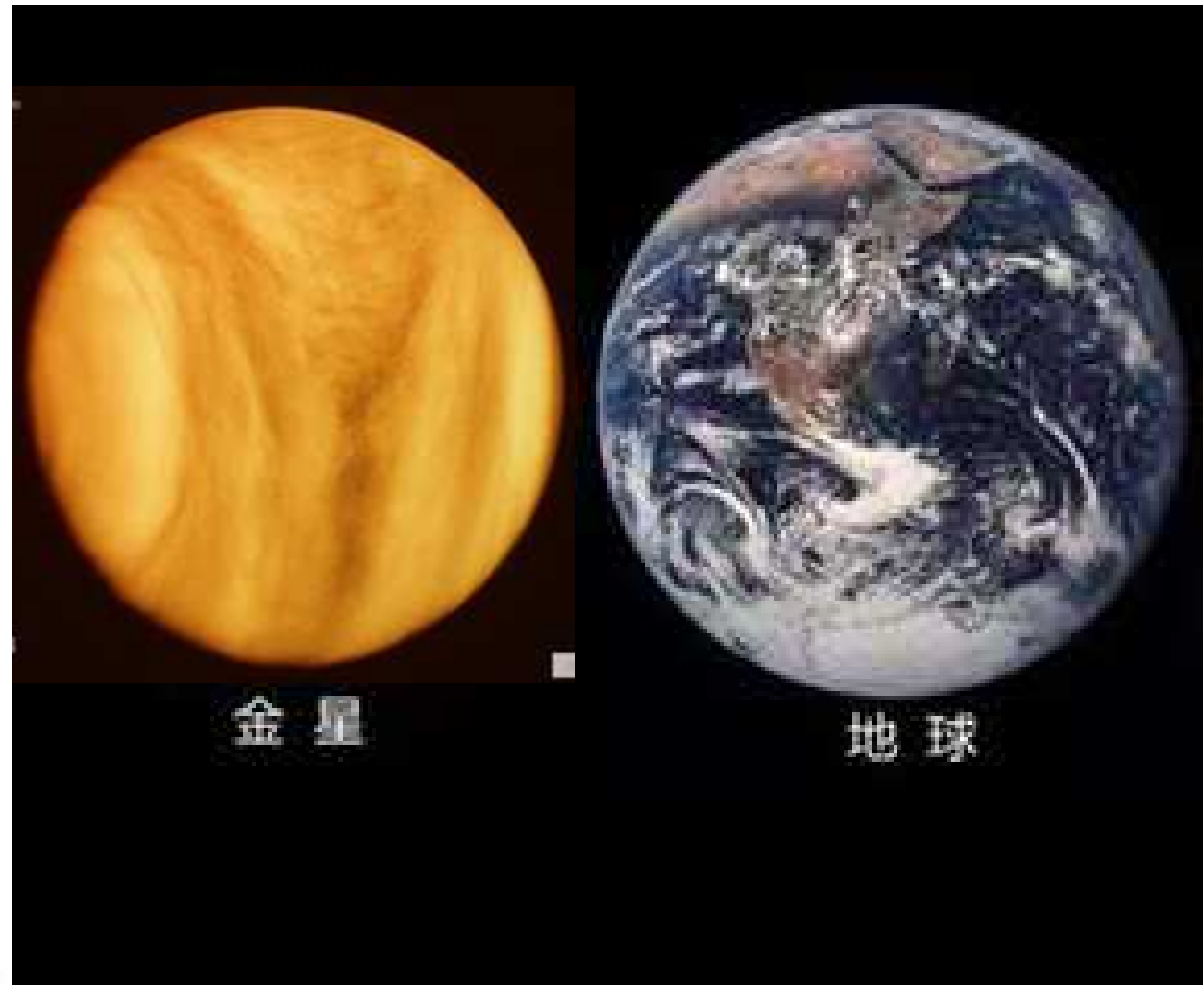
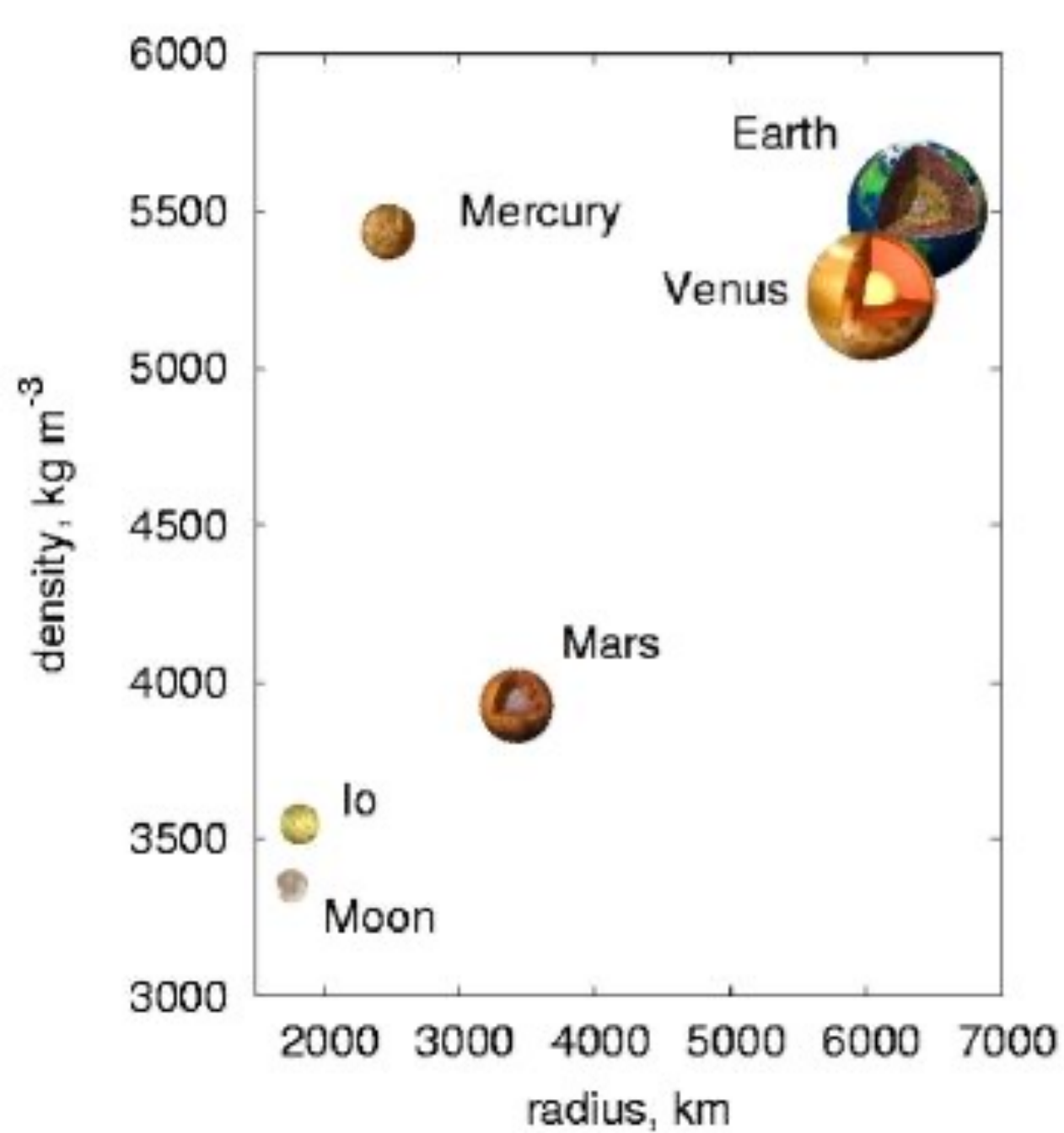
但行星探测又展示了在地球上没有发现的许多不同和多样性，以及行星演化的历史记录，对我们理解行星（和地球）是如何形成的，各种物理和化学过程的复杂相互作用如何创造了行星环境的多样性，甚至能导致生命起源和进化的条件，具有实质性的贡献。

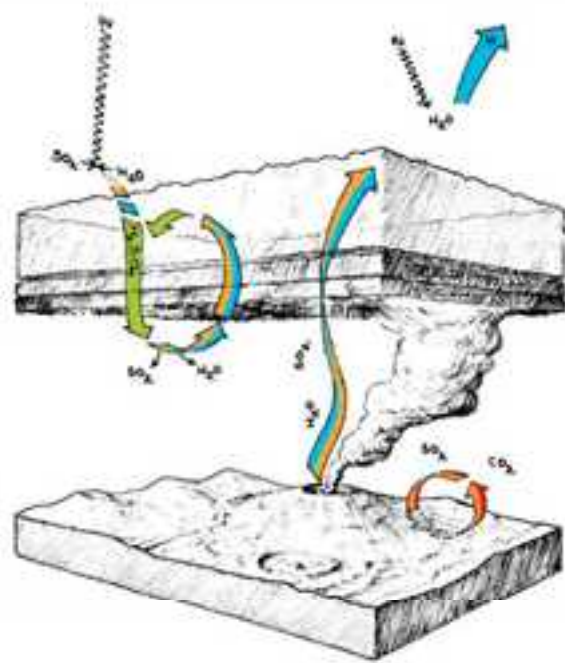
各种行星上可以获得认识世界、认识自然的知识,为进一步改造世界提供丰富的资料。

至于行星探测的发展会带来哪些具体的应用,目前还难以估计。正像二十年前,很少有人想到人造卫星的发展，会带来目前这么广泛的应用一样。

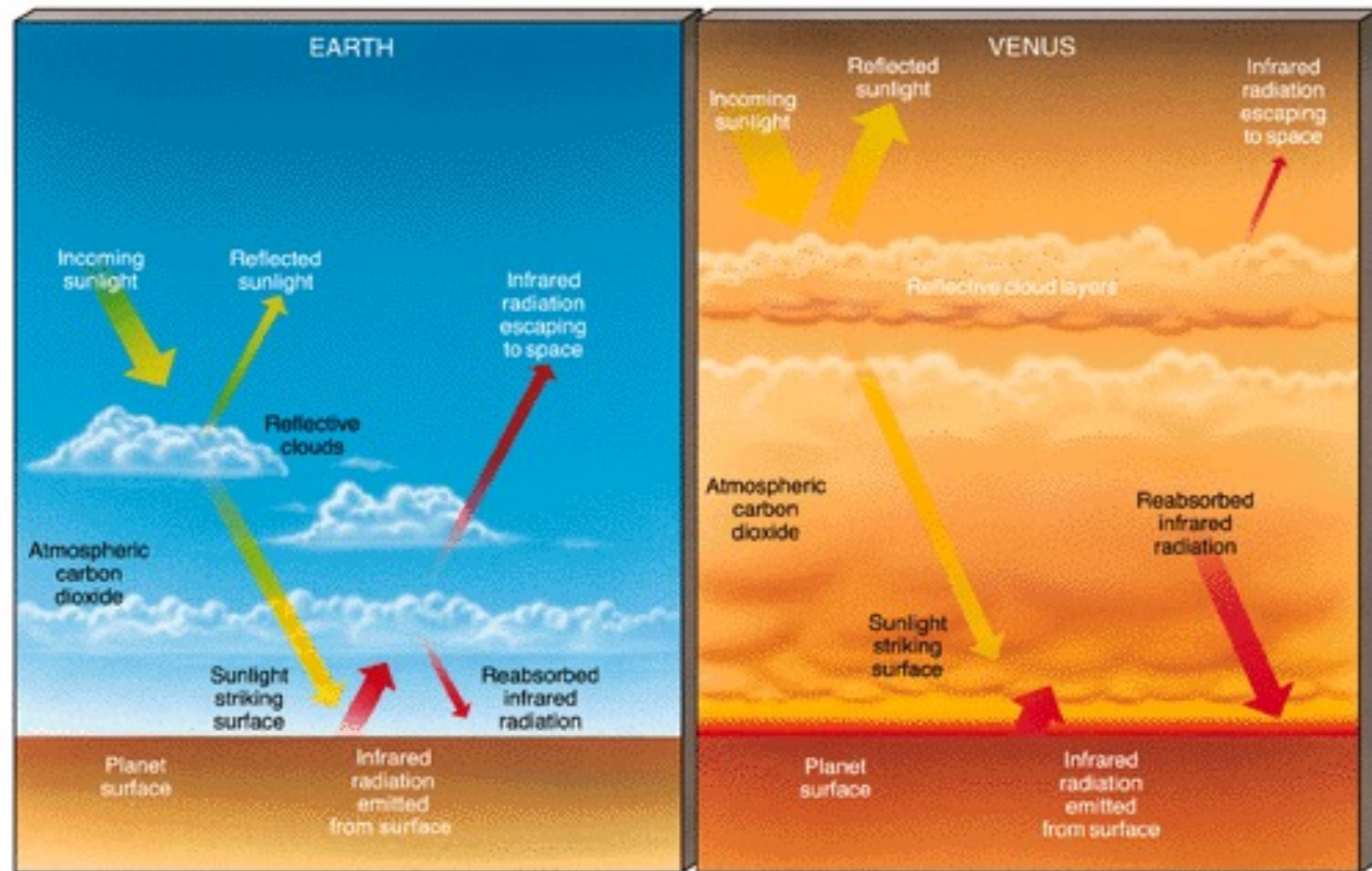
地球科学是行星科学的起始和出发点，但从另一个意义上讲，地球科学又是行星科学的归宿。

地球只是太阳系行星的一员，地球的演化历史，别的行星也会在一定程度上地经历过和记录着，不同演化阶段的行星，可能正是地球演化历史的“化石”。因此行星科学的知识可以反过来促进完善地球科学的理论和预示地球演化的可能方向。

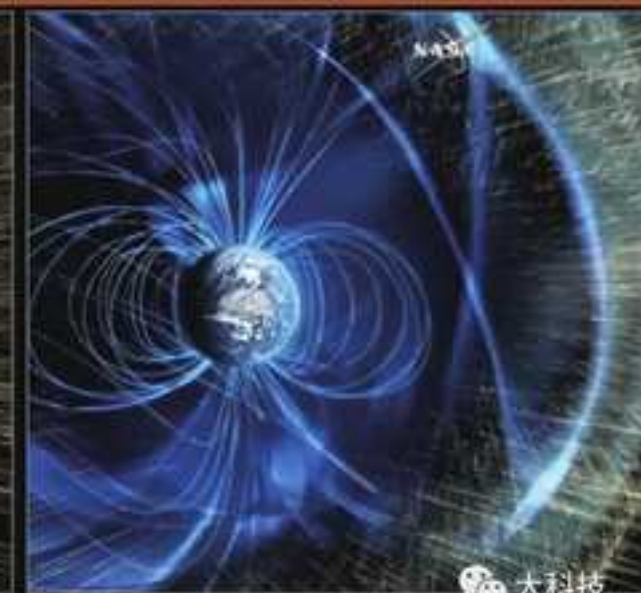




金星的气候由金星内部地质活动(例如,火山强度)、大气运动和大气逃逸作用控制。



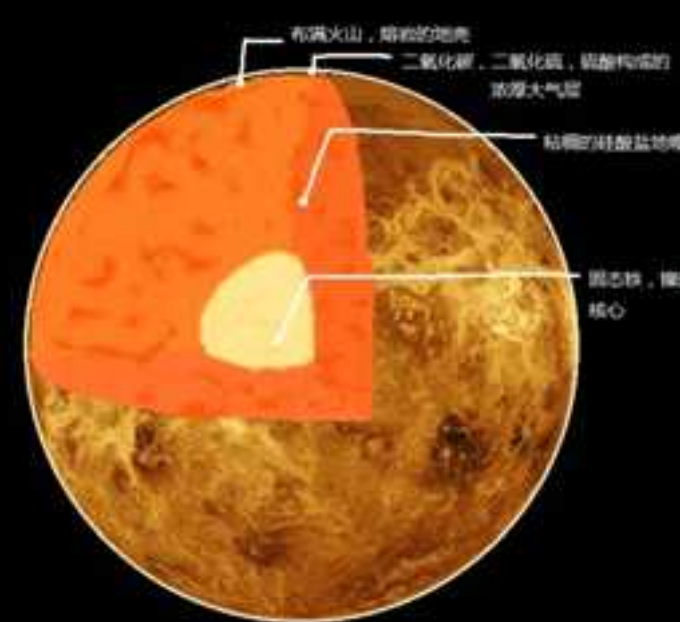
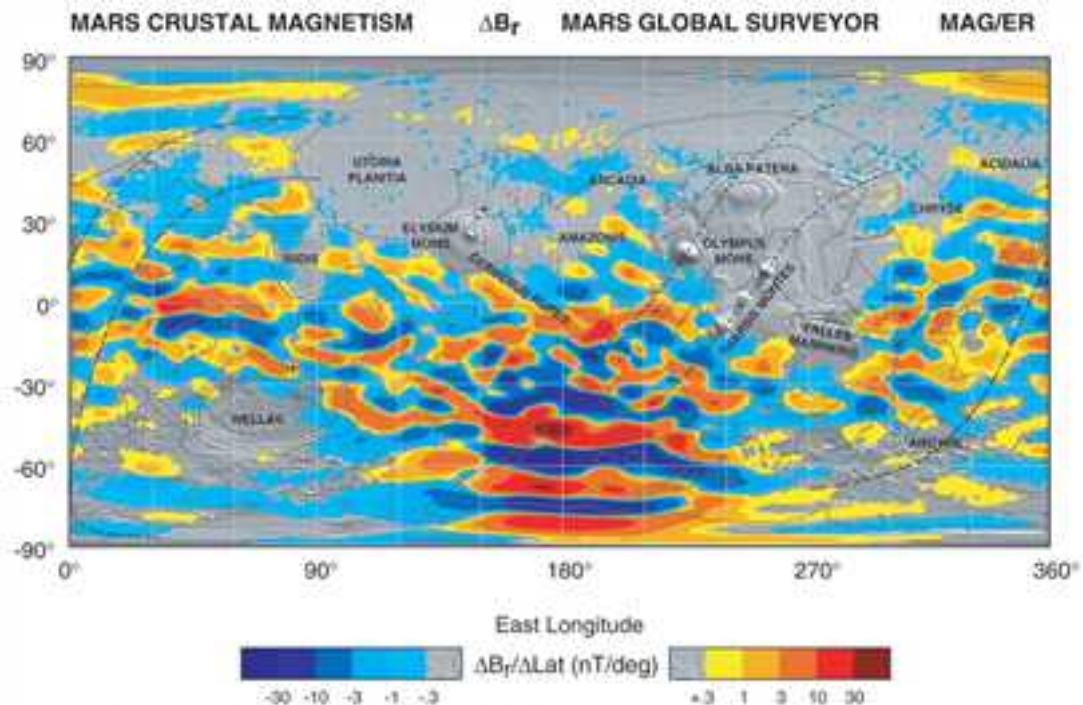
金星与地球云层结构及温室效应比较示意图



地球有磁场保护大气不被太阳风吹走，而火星则没有。

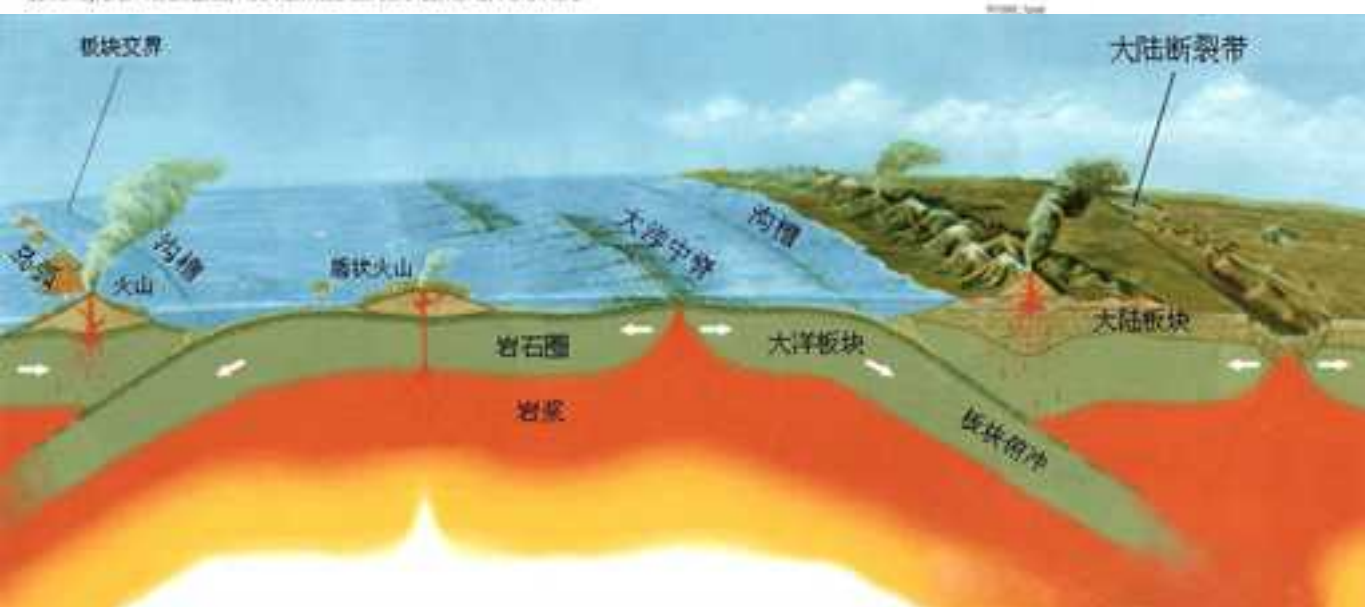
大科技

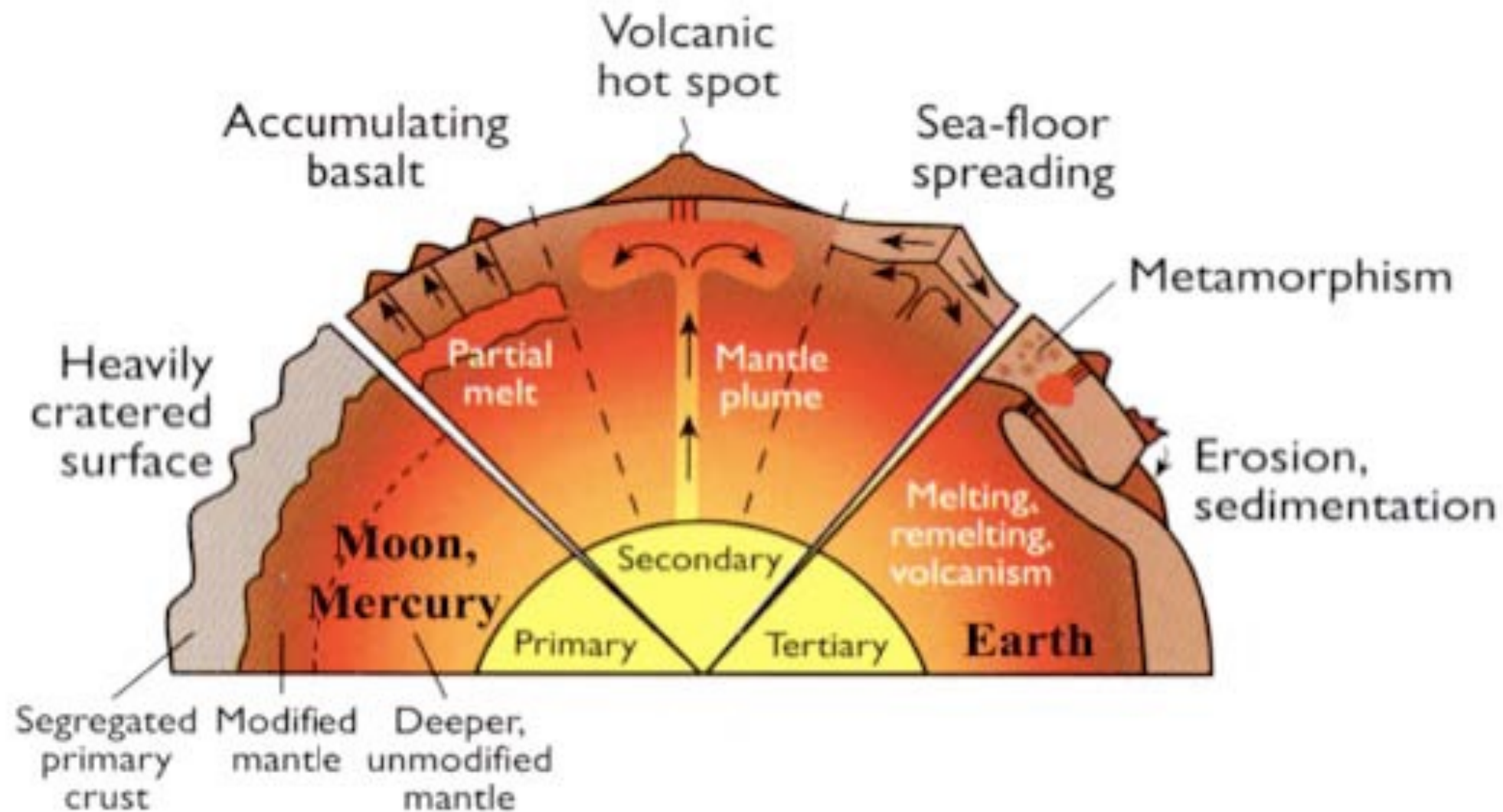


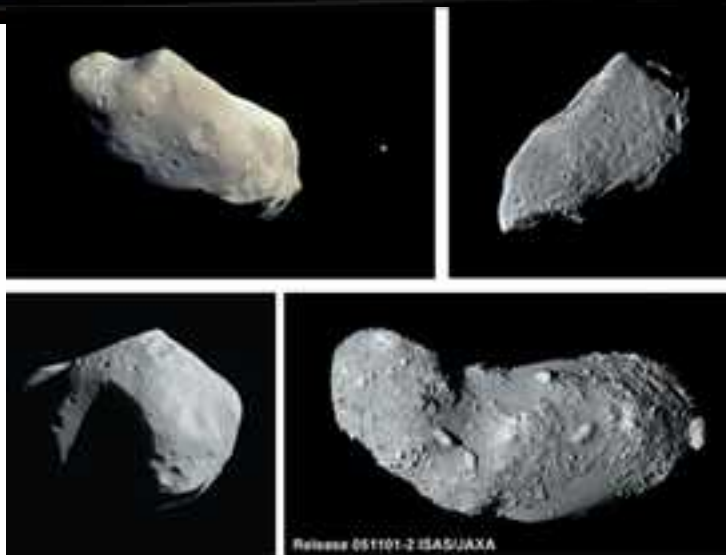


Baidu 百度 | 知识问答

Connerney, J. E. P. et al., (2005) Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 102, No. 42, 14970-14975.







Jupiter



Io



Europa



Ganymede



Callisto

Saturn



Mimas



Enceladus



Tethys



Dione



Rhea



Titan



Iapetus

Uranus



Miranda



Ariel



Umbriel



Titania



Oberon

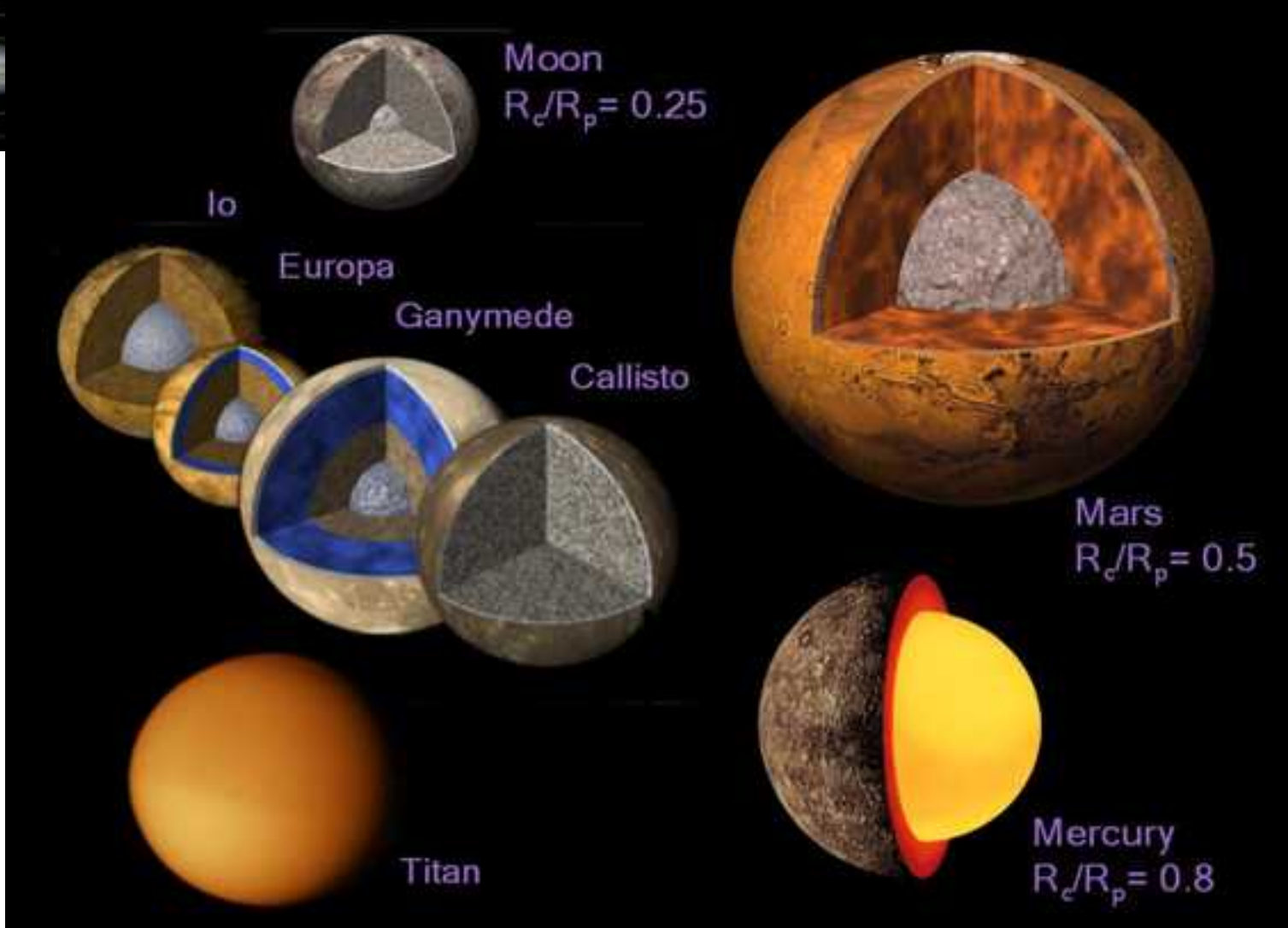
Neptune



Triton



Moon



地球：超基性—基性—中性—酸性—碱性岩

火星：超基性—基性—中性岩（长英质）；

月球：超基性—基性岩

月球演化极不充分，火星演化不充分，地球演化较充分



Planets of the Solar System: Tilts and Spins



稍后观看



分享



谢谢！

