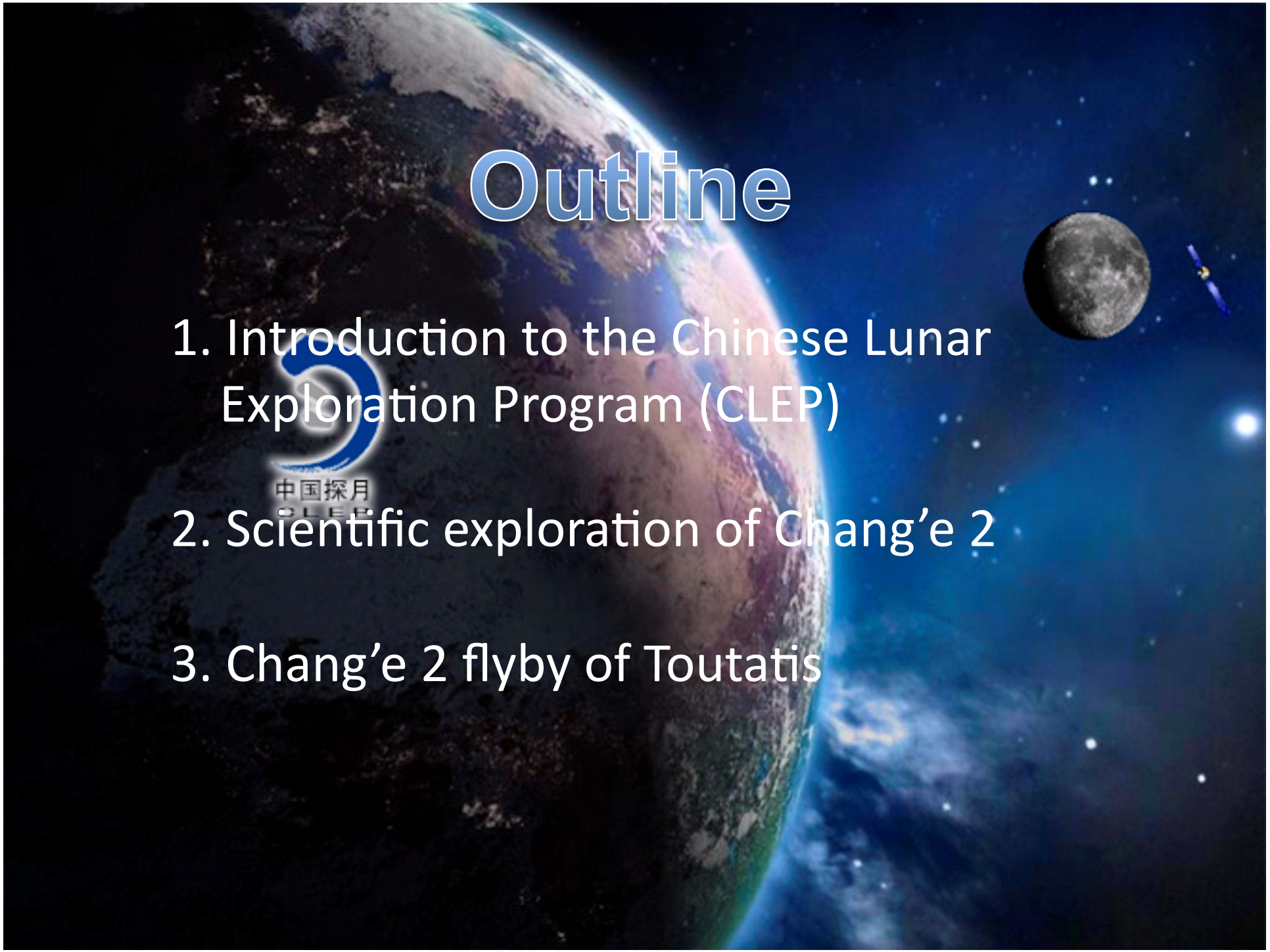
Chang'e 2 Flyby of Toutatis

Chunlai Li,
Executive Chief Mission Designer

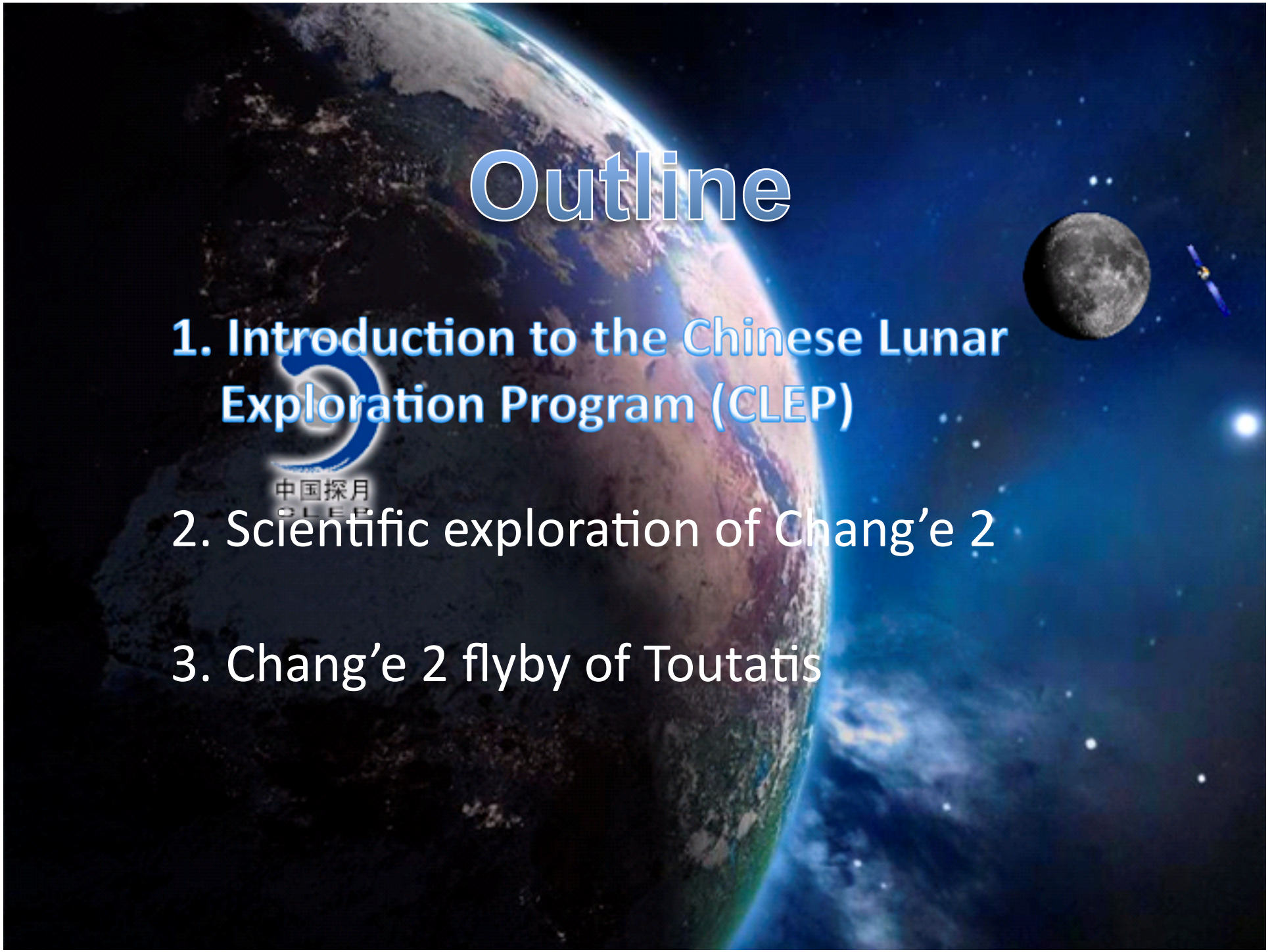
Han Li (lih@nao.cas.cn)
National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences (NAOC)

SBAG January 15, 2013 in Washington, D.C.



Outline

1. Introduction to the Chinese Lunar Exploration Program (CLEP)
2. Scientific exploration of Chang'e 2
3. Chang'e 2 flyby of Toutatis


Outline
1. Introduction to the Chinese Lunar Exploration Program (CLEP)
中国探月
2. Scientific exploration of Chang'e 2
3. Chang'e 2 flyby of Toutatis

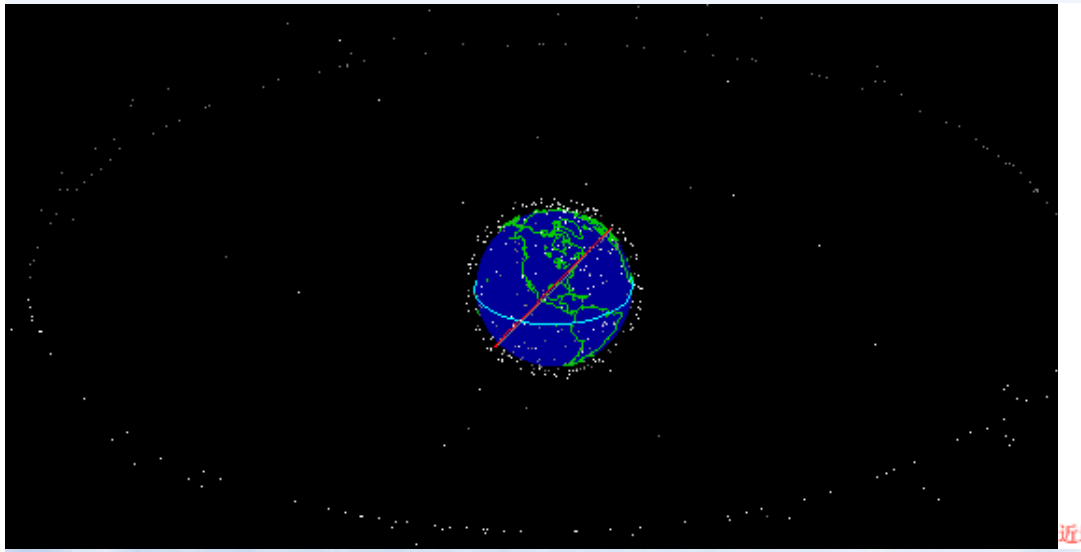
Milestones in Chinese space exploration:

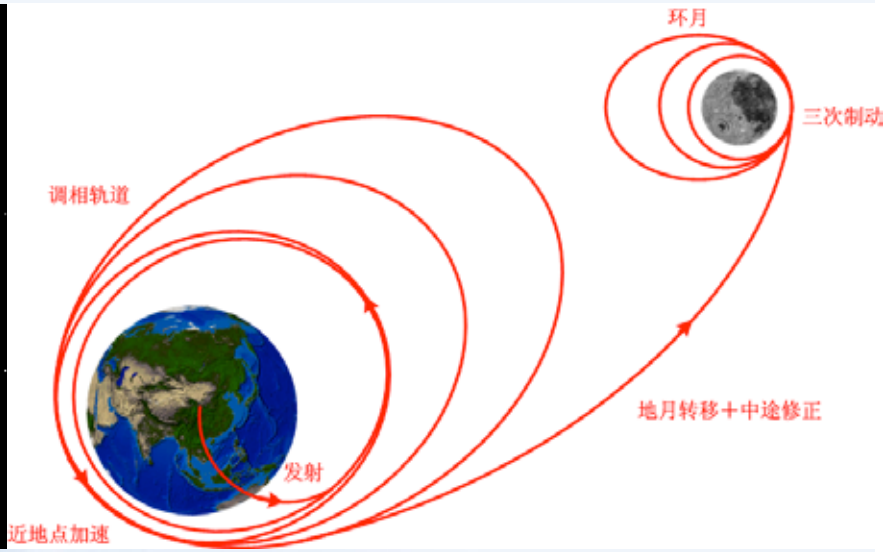
04/24/1970, launch of Dongfanghong-1 satellite

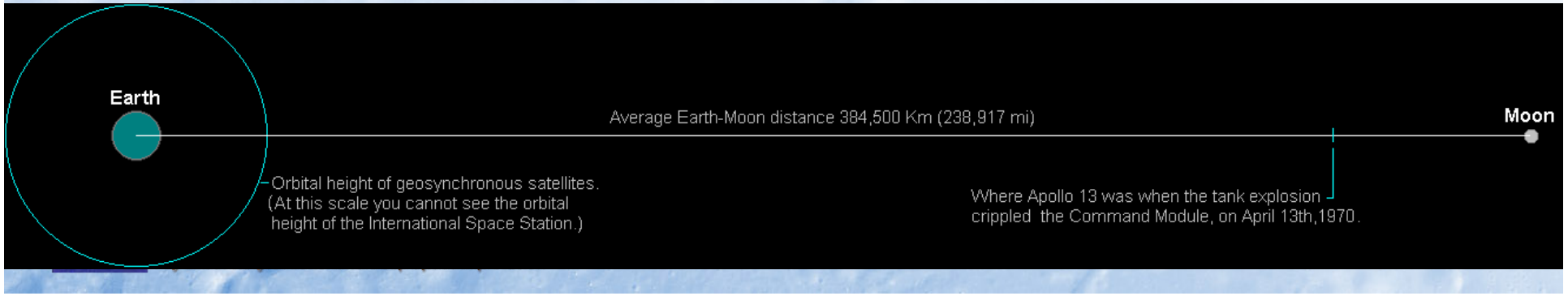
10/15/2003, launch of Shenzhou-5, first Chinese astronaut in space

Another milestone in Chinese space exploration:

10/24/2007, launch of Chang'E 1
11/05/2007, lunar orbit insertion





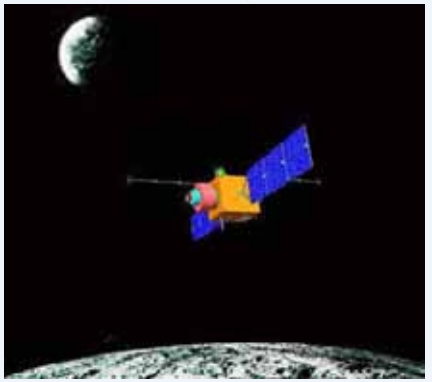


Planning and Strategic Vision of Chinese Lunar Exploration Programme

Exploring: unmanned lunar exploration (2003~2020)

3 phases

- Orbiting (2003-2007)
- Landing (2007-2015)
- Sample return (2012-2020)

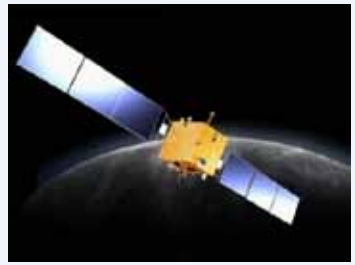


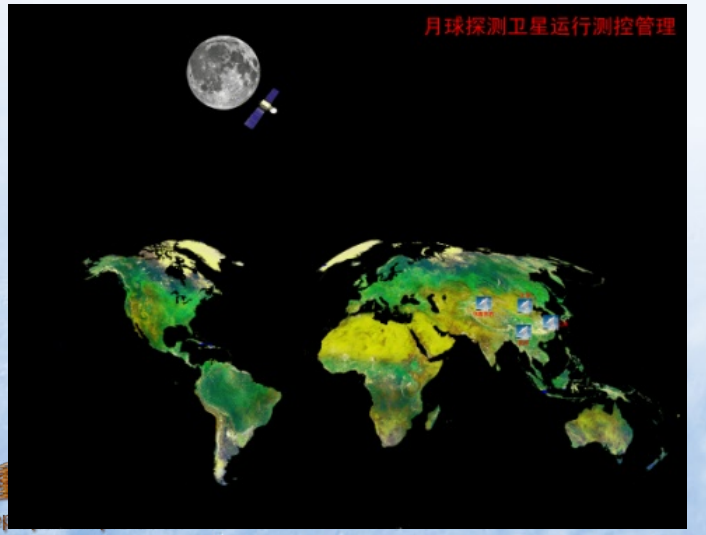
Landing: manned landing on the Moon (precursor missions since 2021; manned mission 2025-2030?)

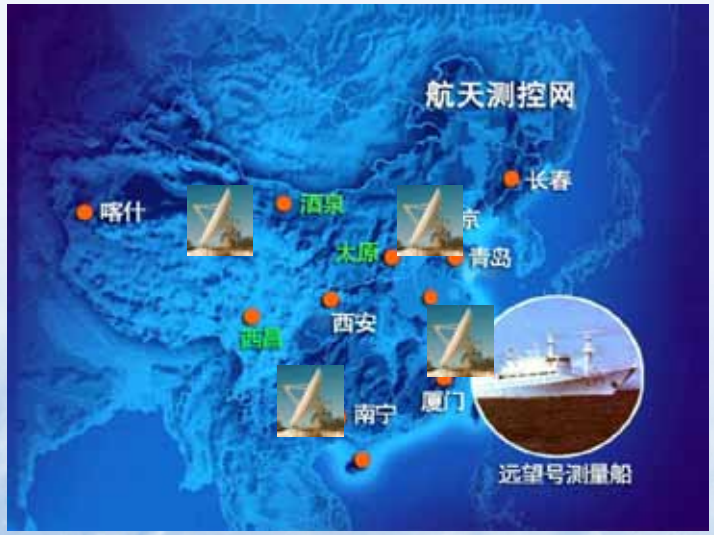
Staying: lunar outposts, human settlements

China Lunar Orbiting Program

- Launch vehicle
- Launch site
- GRAS (Ground Research & Application System)
- TT&C (Tracking, Telemetry, & Command)
- Spacecraft

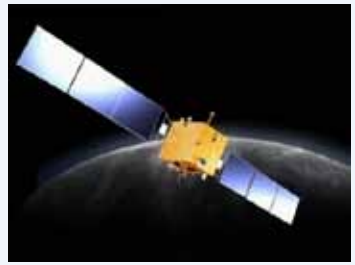




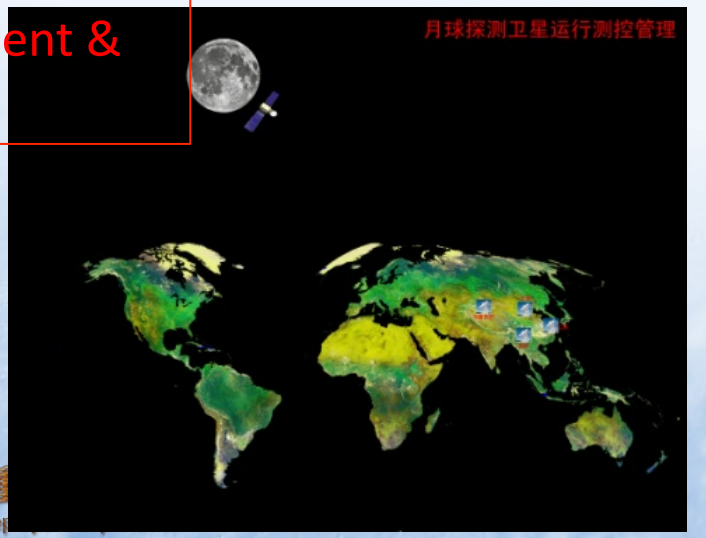


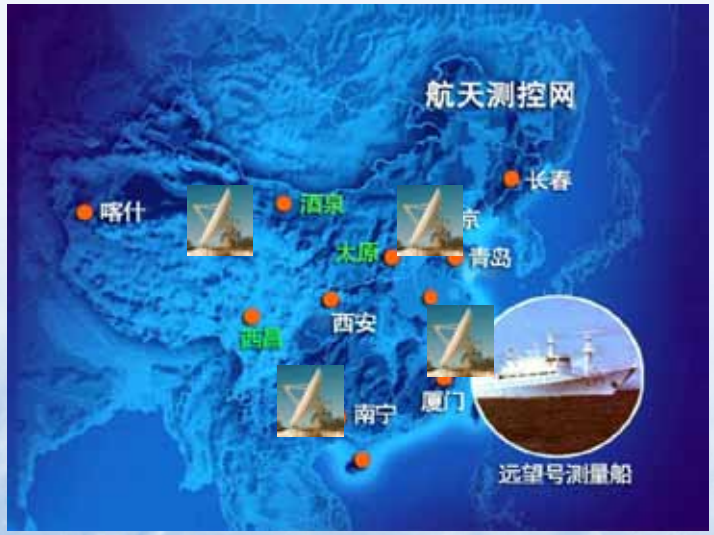
China Lunar Orbiting Program

- Launch vehicle
- Launch site
- GRAS (Ground Research & Application System)
- TT&C (Tracking, Telemetry, & Command)
- Spacecraft

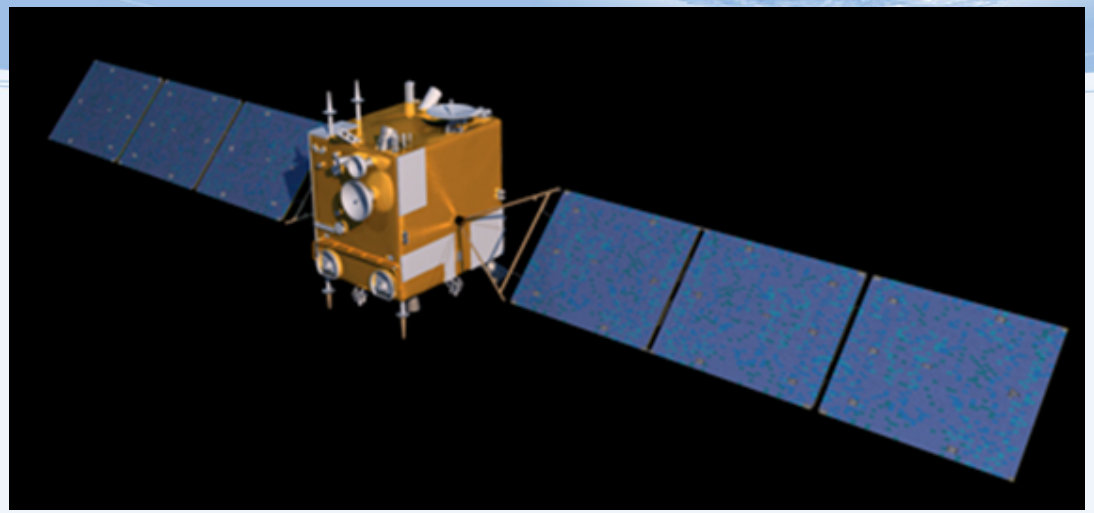


defining scientific goals, selecting payload, data receiving, management & analysis





Spacecraft



Platform	DFH-3
Total mass	2480 kg
Lunar orbit	100 km, polar, circular
Configuration requirements	Tri-axial stability; satellite facing the Moon, solar panel facing the Sun, antenna facing Earth
Operating life	⩾ half a year
System Composition	frame, GNC, thermal control, energy, propulsion, data management, tracking data transmission, payload

TT&C
(Tracking, Telemetry, & Command)

USB+VLBI:

USB测距、控制， VLBI测角

Ground Research & Application System (GRAS)

Miyun Ground Station 50 m antenna scientific data receiving & BLVI precise trajectory monitoring

GRAS Headquarters at NAOC

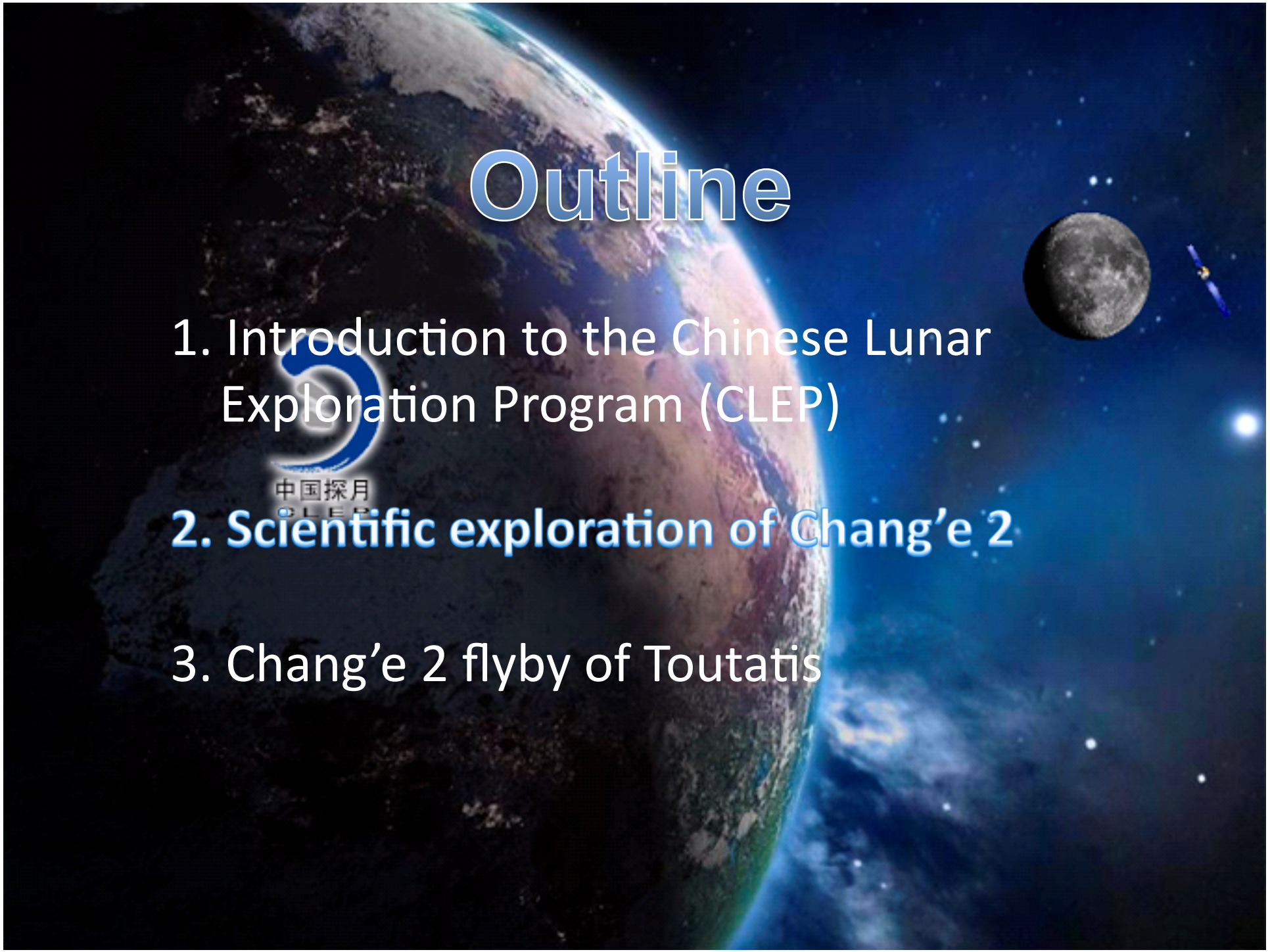
Kunming Ground Station 40 m antenna downlink scientific data receiving and VLBI trajectory monitoring

GRAS Headquarters at NAOC

double channel Stereo projection screen

Computer servers

Mission Control center


Outline
1. Introduction to the Chinese Lunar Exploration Program (CLEP)
中国探月
2. Scientific exploration of Chang'e 2
3. Chang'e 2 flyby of Toutatis

Scientific Goals and Payload Design

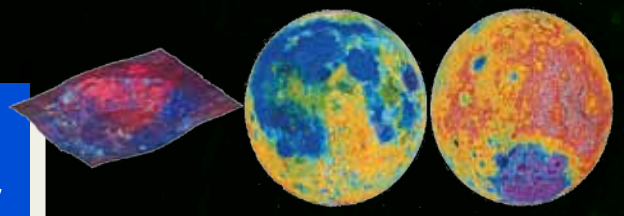
Four Scientific Goals of CE-2：

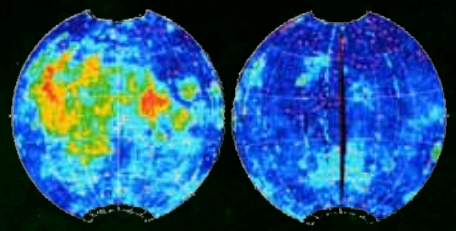
（1） To obtain stereo images of the Moon with resolution better than 10 m/pix

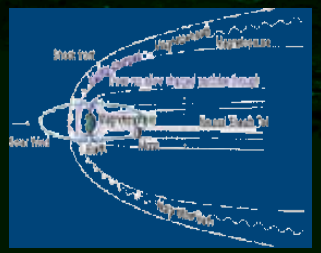
（2） To detect the composition of the Moon

（3） To detect lunar regolith properties

（4） To explore terrestrial-Moon and near Moon space environment







NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

Six Engineering Goals of CE-2:

(1) Direct launch into the Earth-to-Moon transfer orbit

(2) Proving **100 km** lunar orbit capture technology

(3) Proving **100 km×15 km** orbit fast tracking technology

(4) High-resolution imagining of Chang'e 3 candidate landing area Sinus Iridum

(5) Proving **X**-band deep space tracking technology, testing deep space tracking system

(6) Testing technologies such as 12 Mbps high-speed data transmission, low-density parity check coding (LDPC), light-weight CMOS monitoring and landing cameras


地面应用系统
GRAS
星箭分离
太阳翼展开
定向天线展开
轨道修正
空间环境探测
巡航
X频段测试试验
紫外导航试验
建立工作姿态
制动
(三次)
建立点火姿态
中国科学院国家天文台
NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES
NAOC

Mission Summary

Lunar Mission

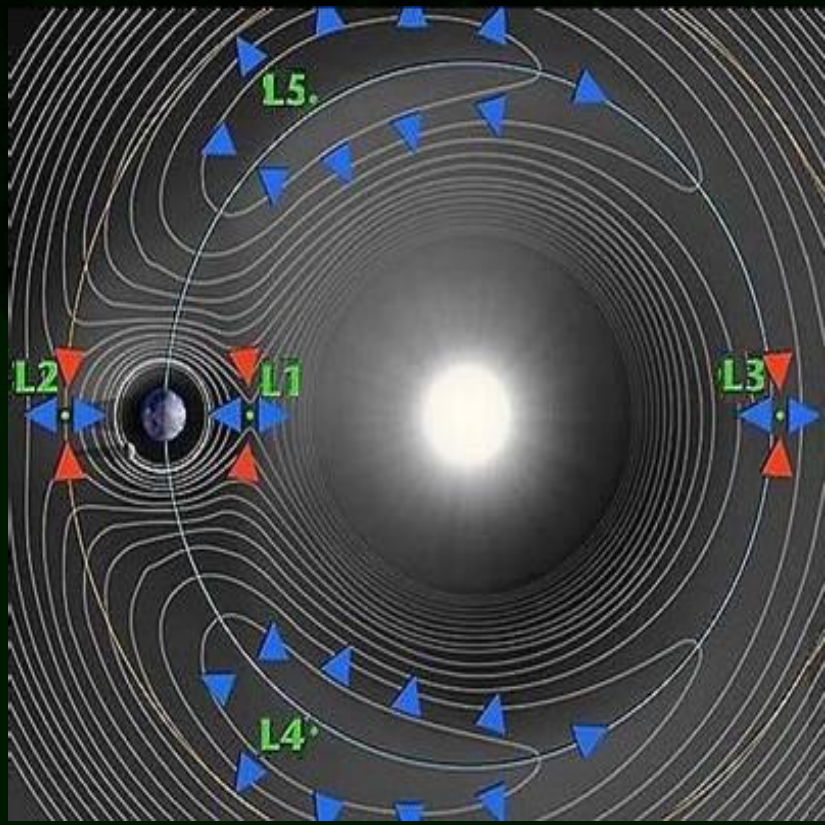
- 10/01/2010, zero-window launch from Xichang Satellite Launch Center and directly entering an Earth-to-Moon transfer orbit
- 10/06/2010, entry into lunar orbit
- 10/29/2010, obtaining first high-resolution image of Sinus Iridum
- 04/01/2011, reaching the end of designed operation life, successful completion of all engineering and scientific goals

NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

Mission Summary

Extended Mission

- 05/21/2011, low-altitude imaging of Sinus Iridum again, mainly to prove ignition control of the main engine in the far side untrackable arc
- 06/09/2011, escape from lunar orbit for the Earth–Sun L2 Lagrangian point

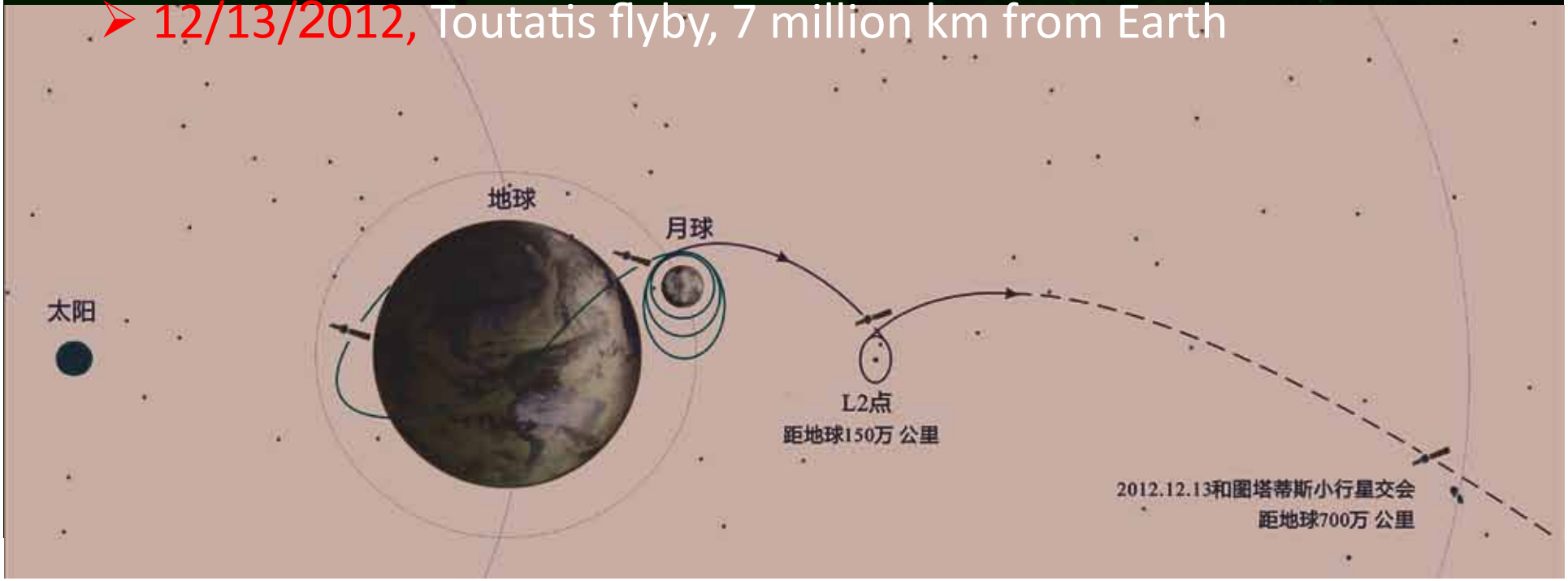


NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

Mission Summary

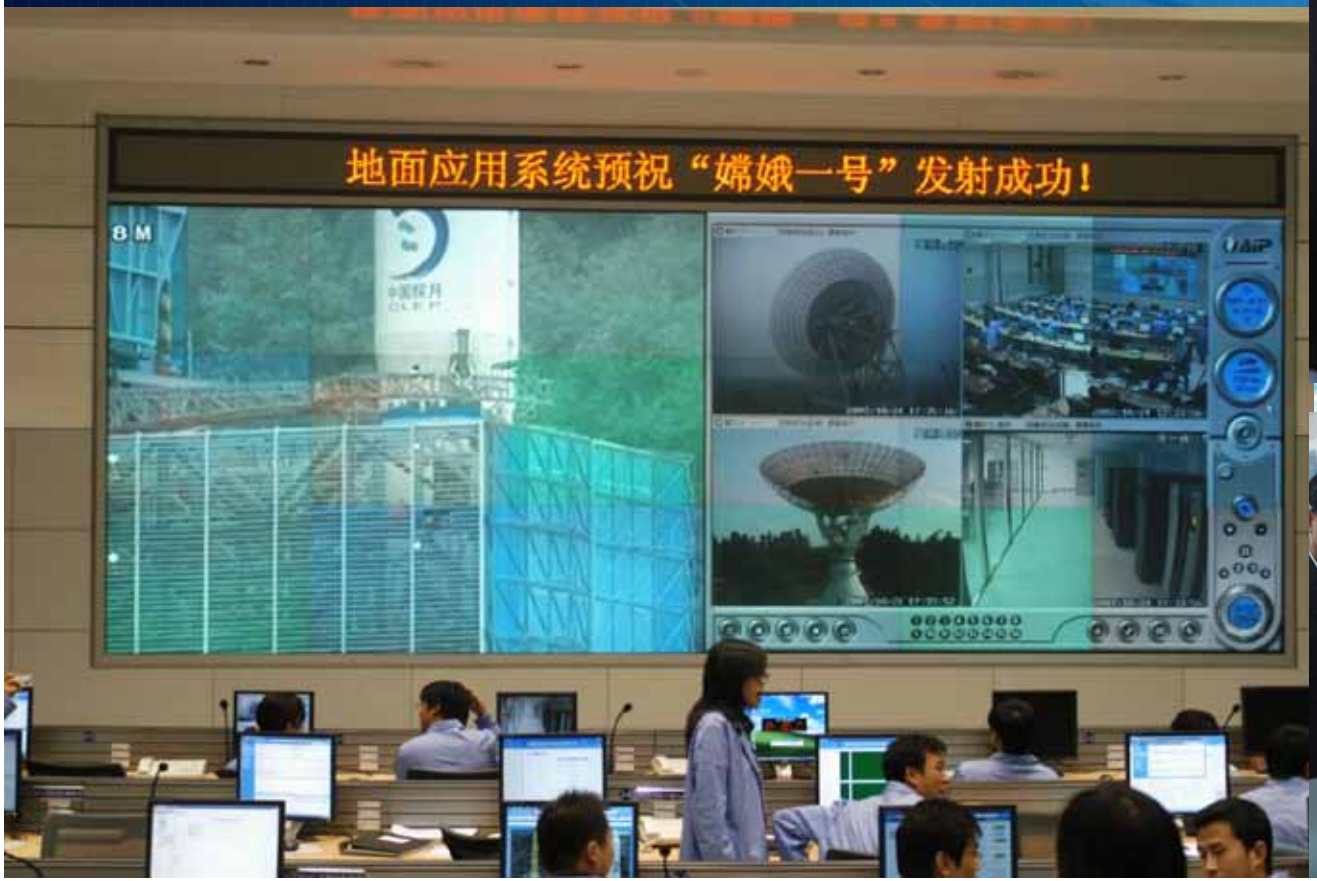
Extended Mission (cont'd)

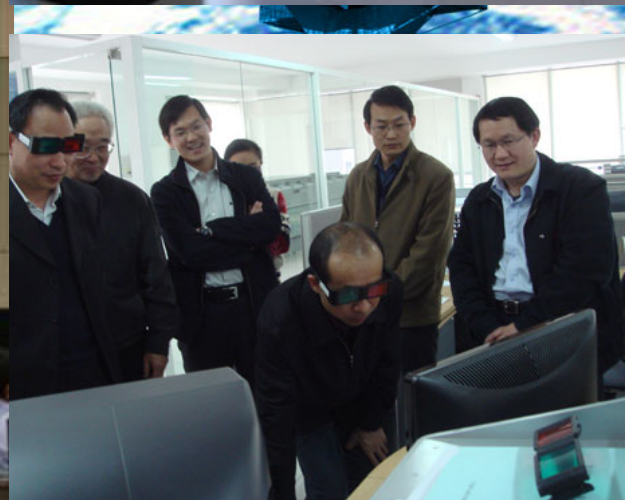
- 09/01/2011, reaching the Earth–Sun L2 Lagrangian point, 1.7 million km from Earth
- 06/01/2012, departure from L2 for asteroid Toutatis
- 12/13/2012, Toutatis flyby, 7 million km from Earth



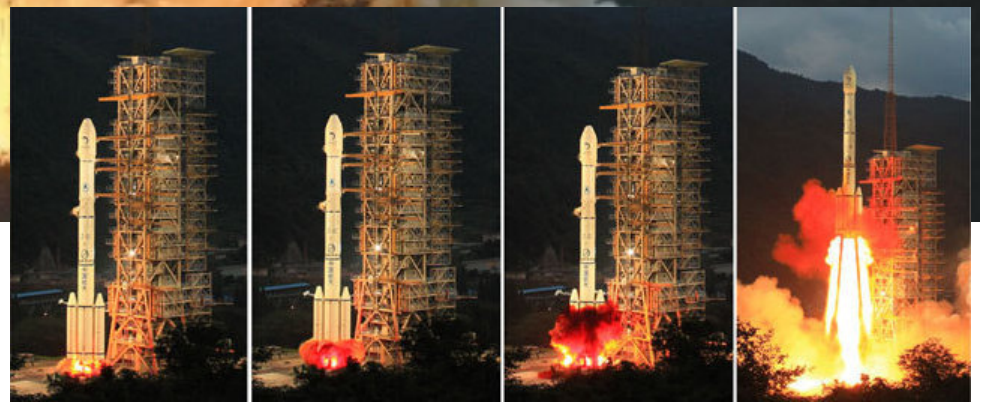
在中科院国家天文台建成月球探测运行管理、数据处理、数据管理和科学研究平台

- 卫星有效载荷监视和探测任务管理
- 月球探测的数据中心
- 探测数据预处理
- 国内第一个较完整的月球科学研究的基础体系

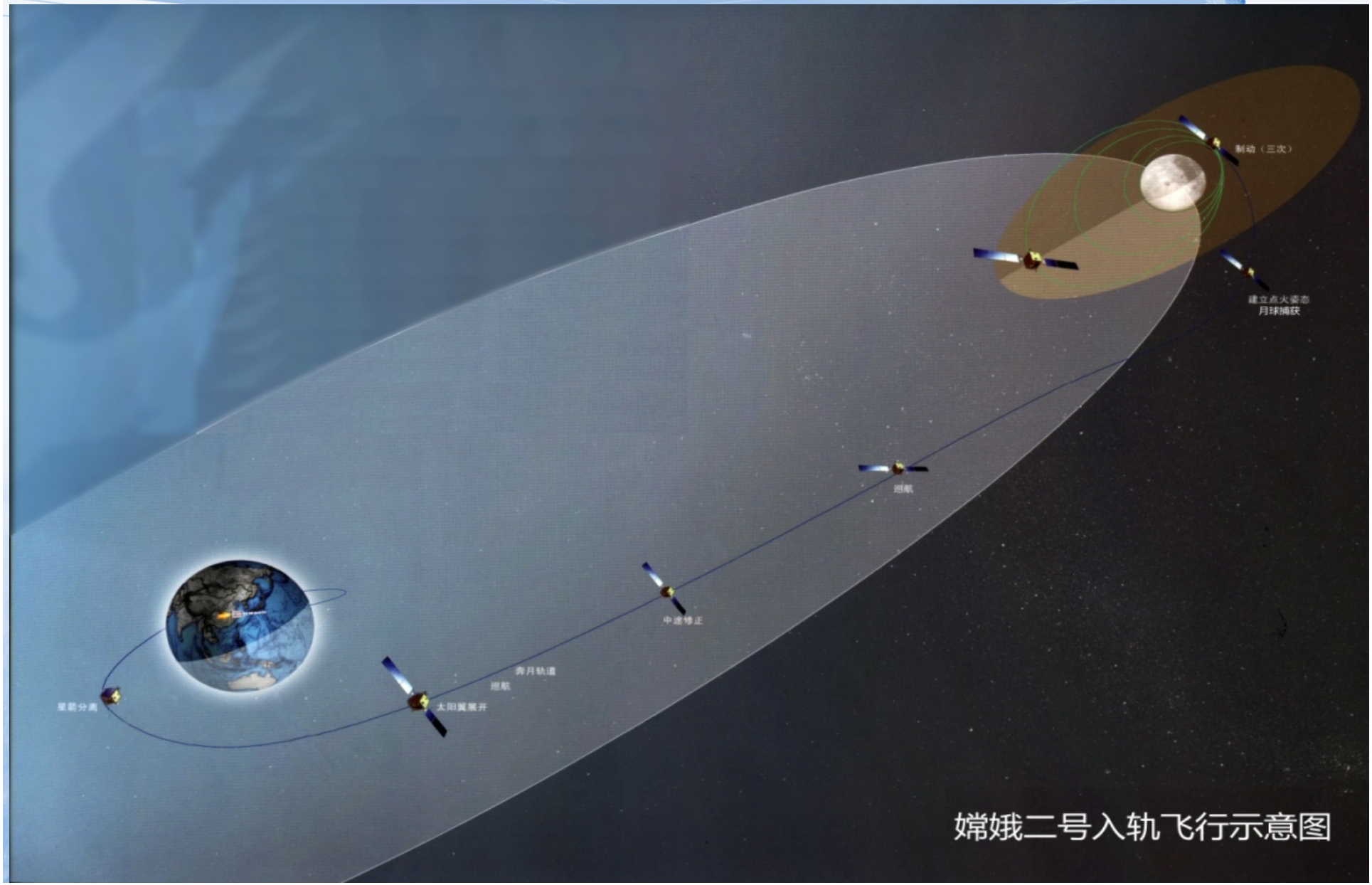




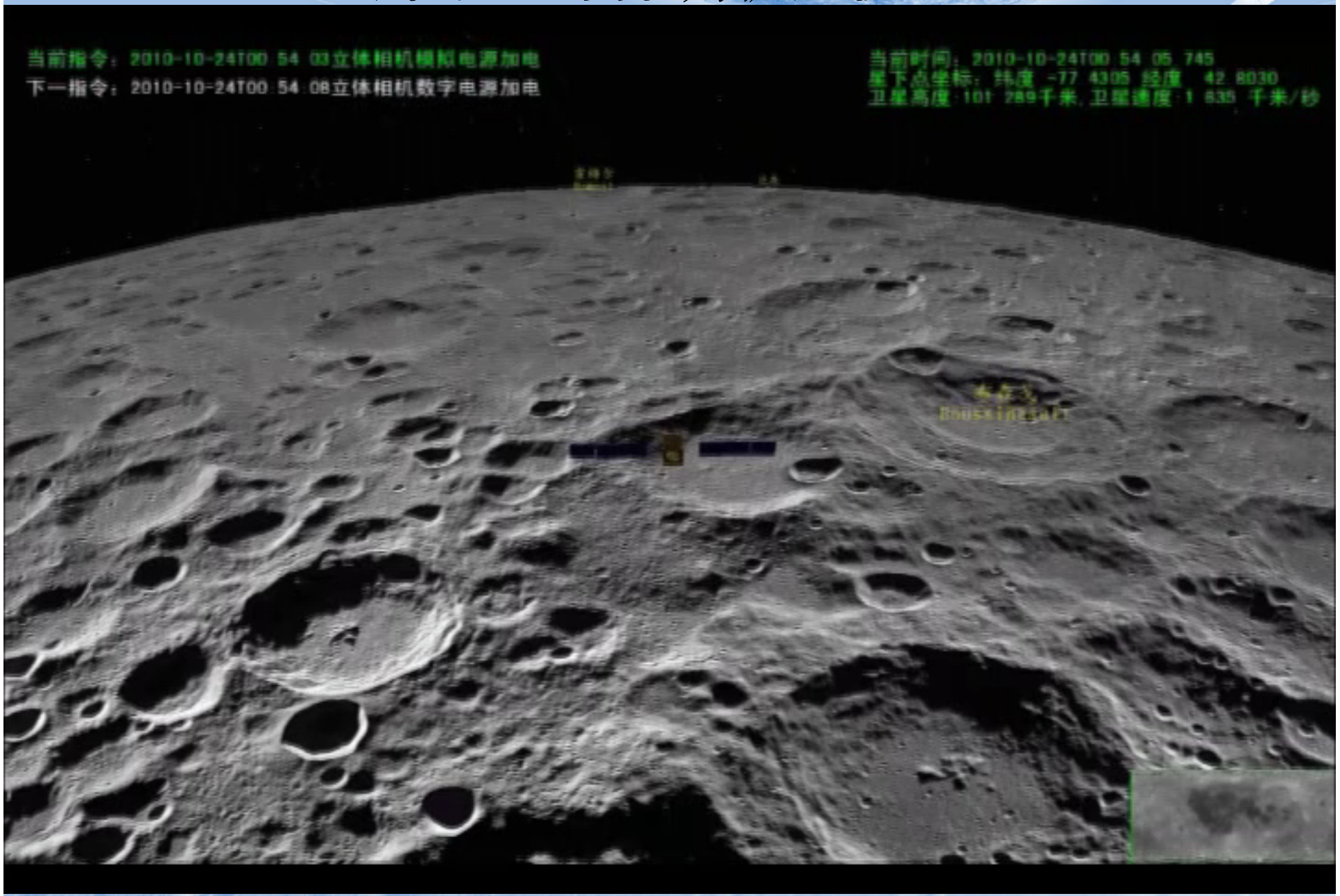
10/01/2010 , 18:59’57.345 ” -- zero window launch



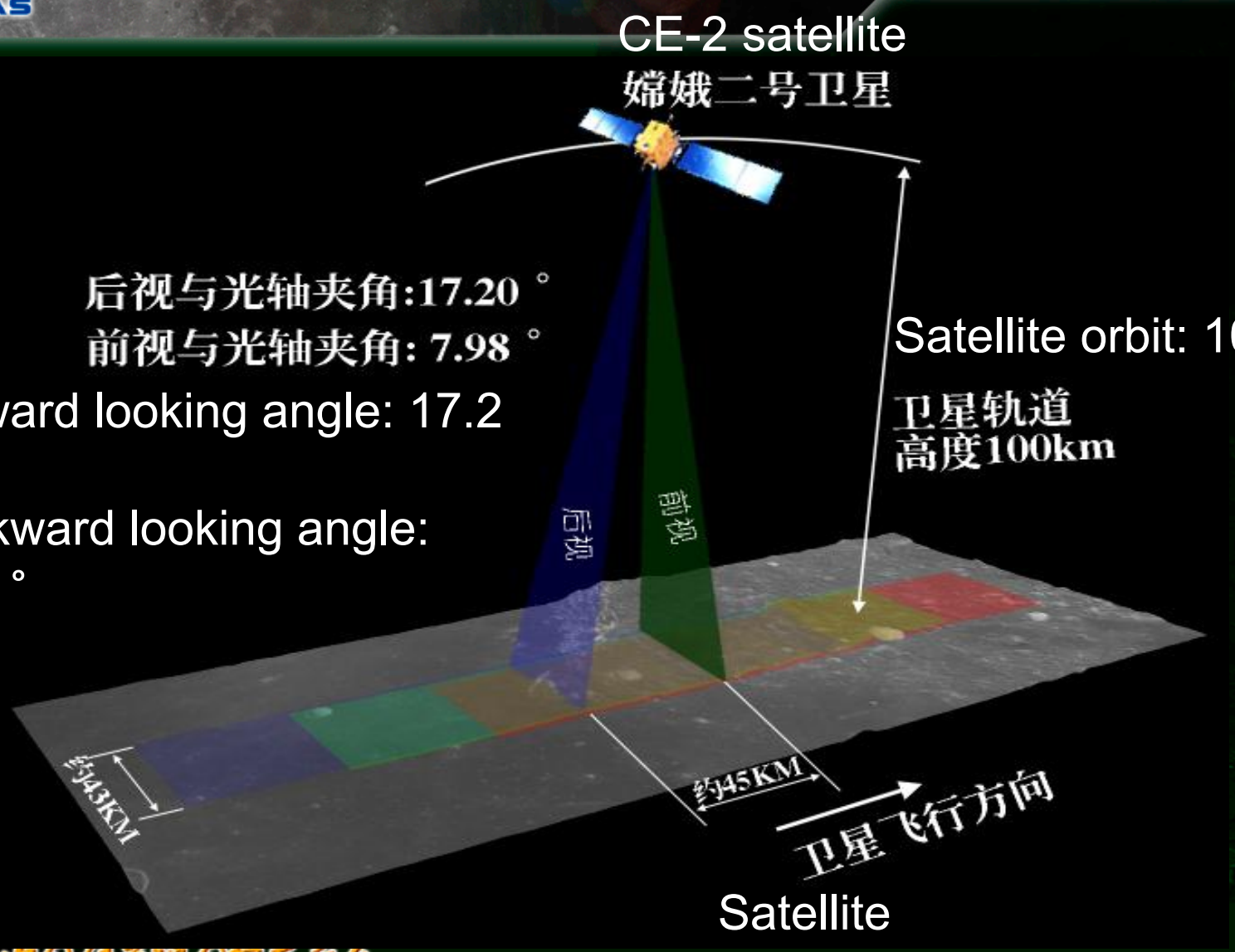
嫦娥二号奔月过程主要飞行事件



嫦娥二号探测轨道模式


当前指令：2010-10-24T00 54 03立体相机模拟电源加电
下一指令：2010-10-24T00 54 08立体相机数字电源加电
当前时间：2010-10-24T00 54 05 745
星下点坐标：纬度 -77 4305 经度 42 8030
卫星高度 101 289千米，卫星速度 1 635 千米/秒

CE-2 Stereo Camera

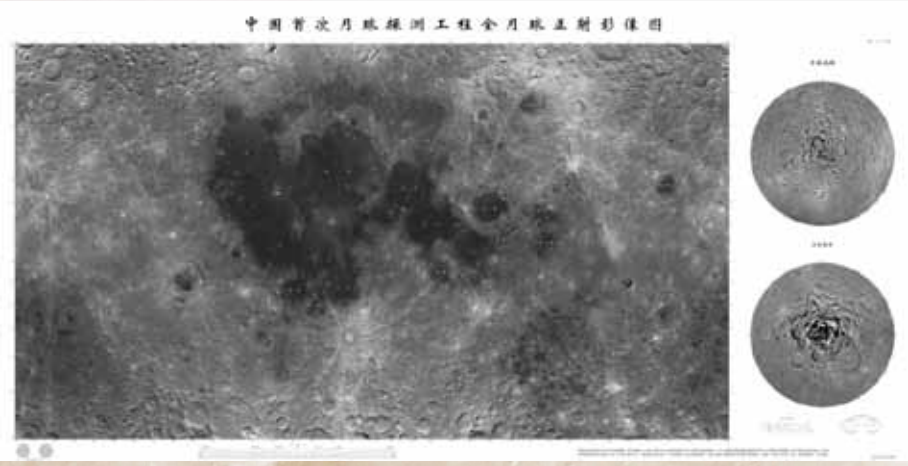


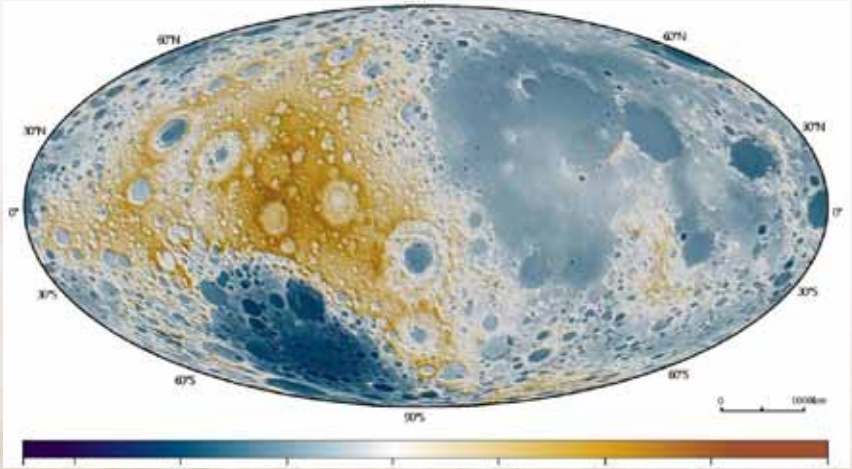
Forward looking angle: 17.2 °

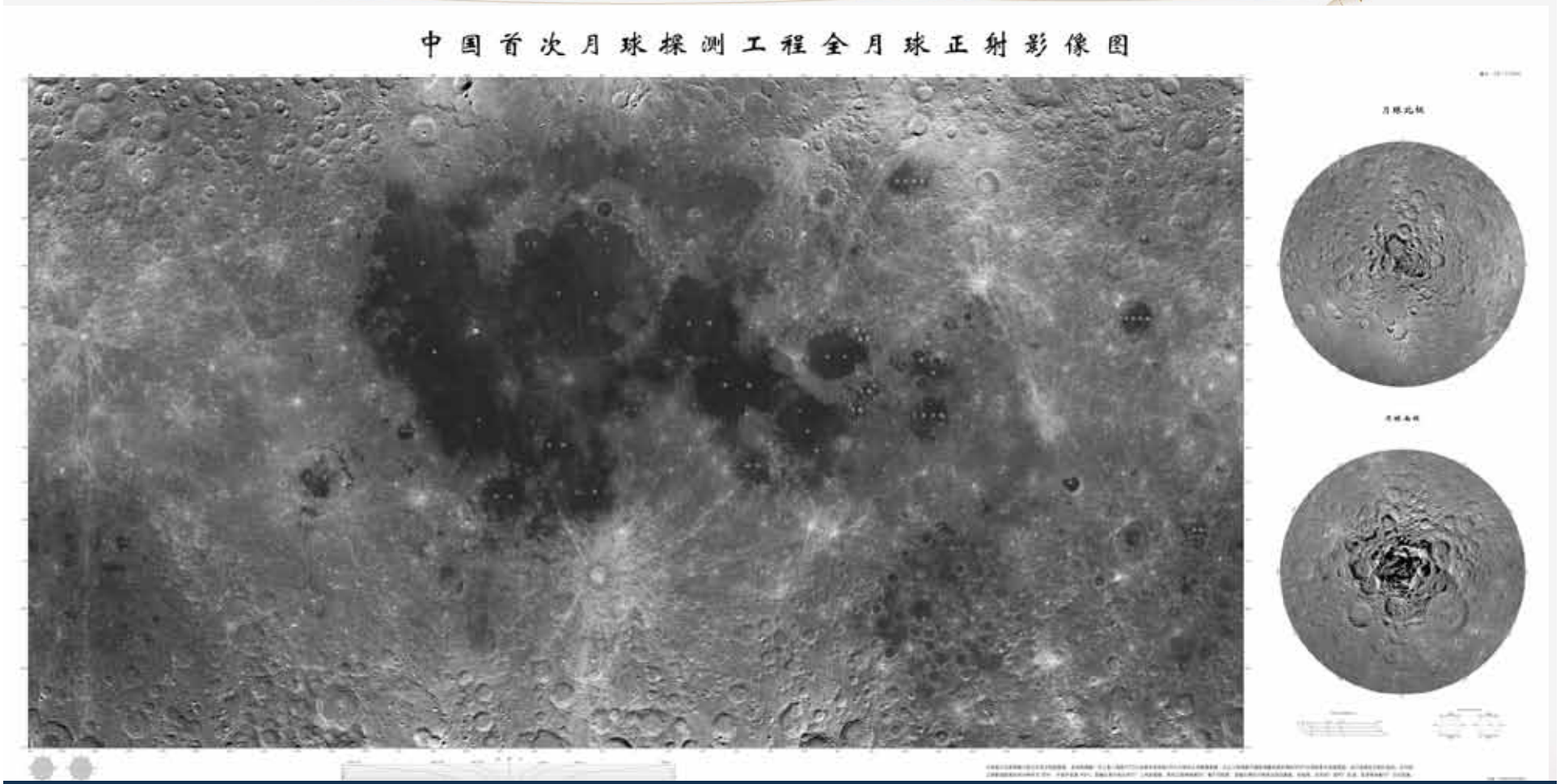
Backward looking angle: 7.98 °

Satellite direction

- 国际先进 / 国际领先的全月球数字地图产品，包括：
  - CLEP global lunar image map 120 m/pix
  - CLEP global topography map 地形图 500 m/pix
  - CE-2 global map 7 m/pix

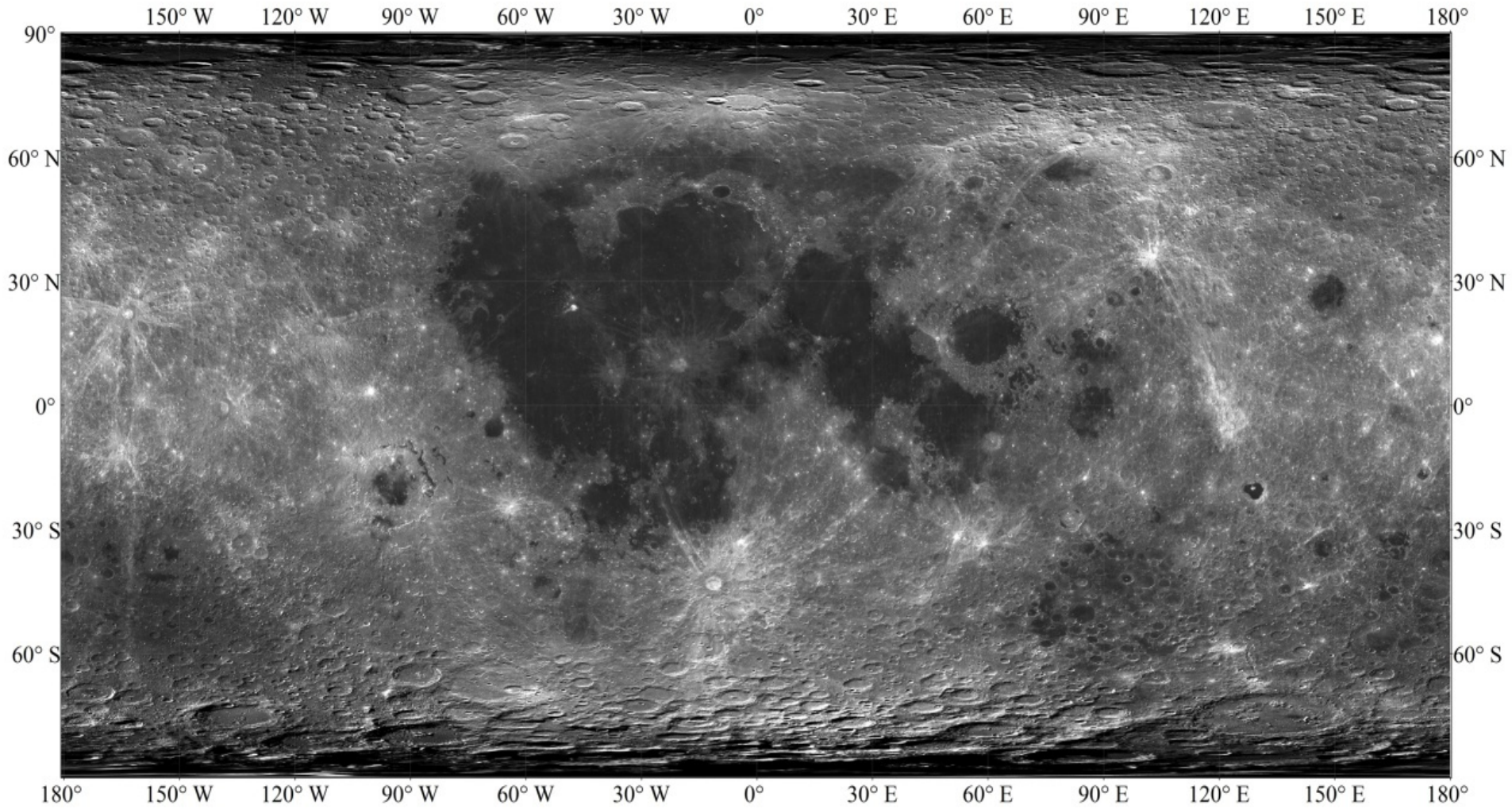






Lunar Base Map: 全月球正射影像图。迄今为止国际上变形程度最低、位置精度最高（平面192m，高程 500m）、图像色调最一致和空间覆盖最完整的全月球正射影像图

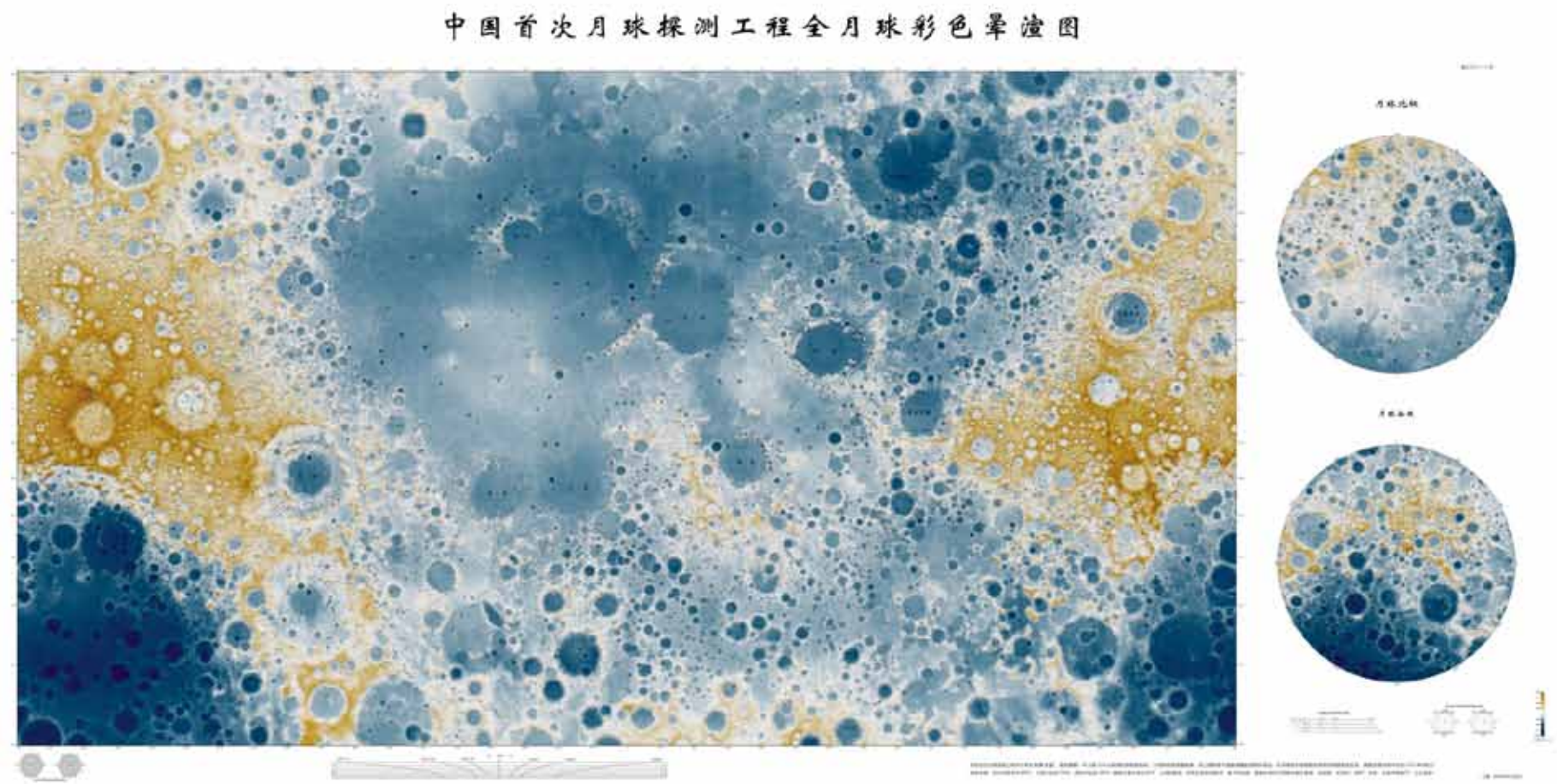
7 m/pix orthophoto map of the whole Moon



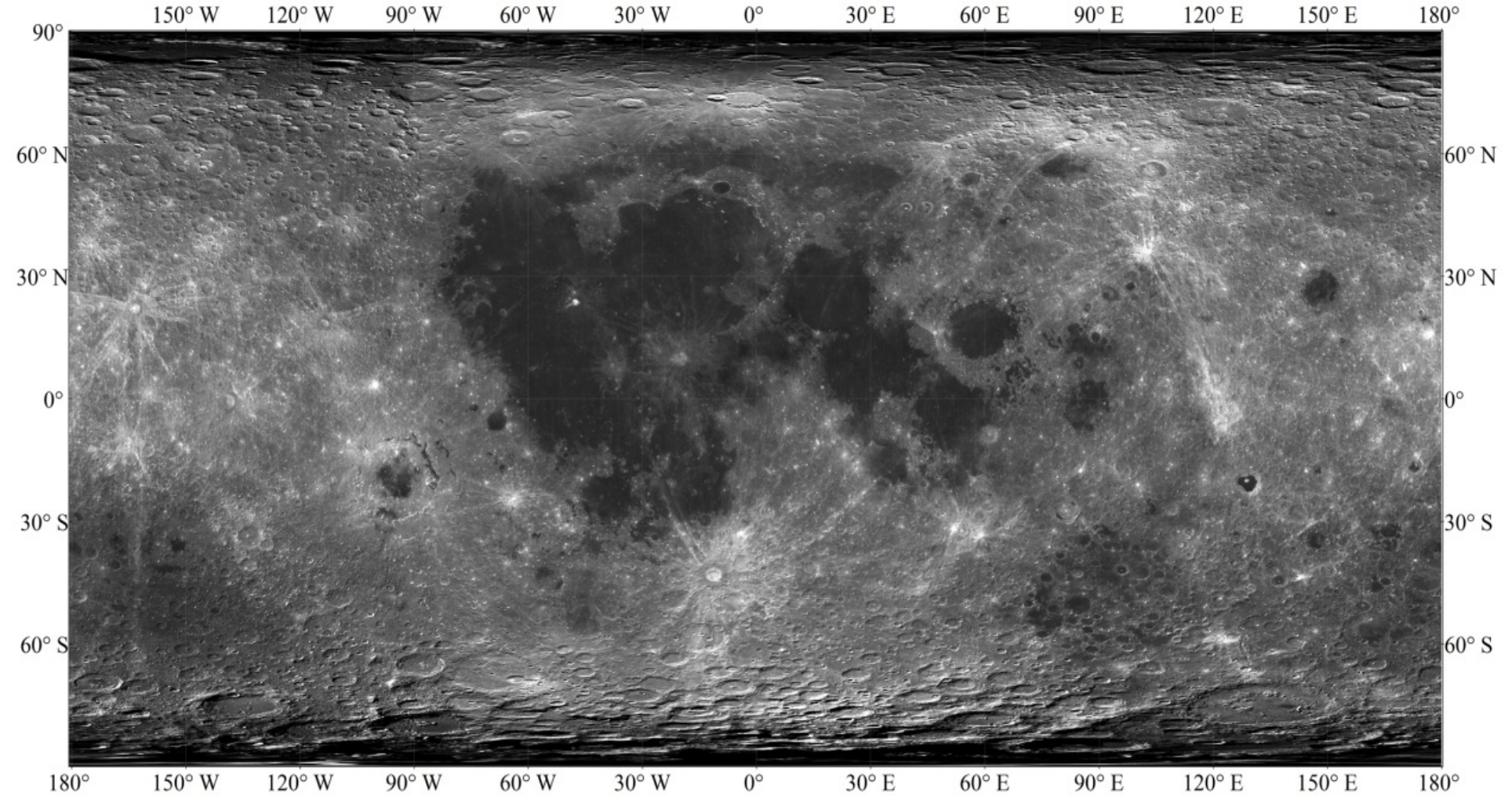
空间分辨率和月面覆盖比较

	Mission	图像原始分辨率 (m/pix)	制图分辨率 (m/pix)	Coverage
China	**CE-1（2007）**	**120**	**120**	**100%**
	CE-2（2010）	**6.07～8.23**	**7**	**100%**
		1～1.5		局部
US	**Clementine（1995）**	**100～400**	**100**	**95%**
	LRO（2009）	**100**	**100**	**100%**
		0.5～1.5		～55.9%
ESA	Smart-1（2003）	100's		局部
Japan	**SELENE（2007）**	**9～12**	**7.4**	**92.4%**
India	月船（2008）	5～10		局部

（2）三线阵CCD解析DEM三维地形数据



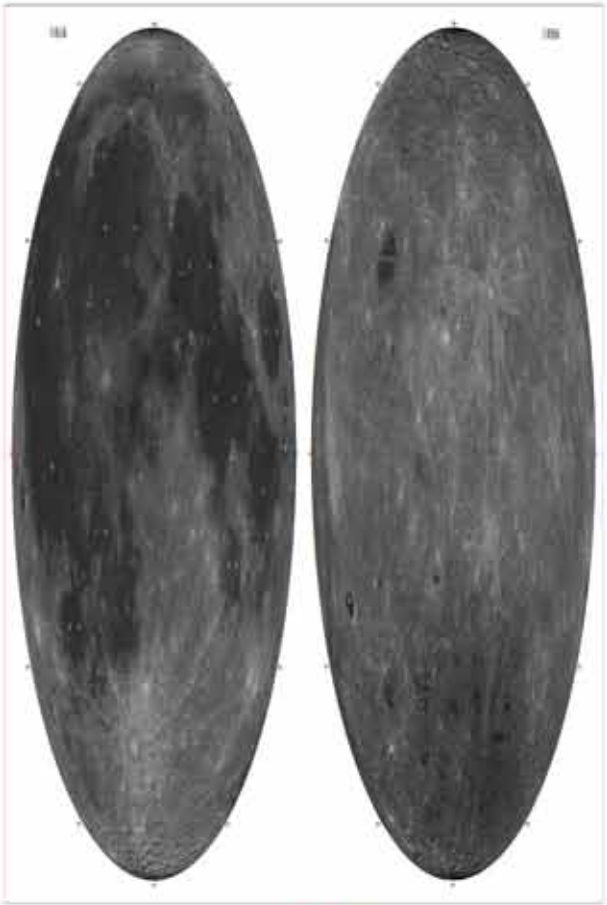
DEM's		美国ULCN DEM	SELENE 激光高度计DEM	CE-1激光高度 DEM	嫦娥一号三线阵CCD解析DEM
数据来源		Clementine激光高度计极区CCD图像解析 Mariner 10、Galileo、阿波罗数据、地基观测定位数据	Selene 激光高度计	嫦娥一号激光高度计	嫦娥一号三线阵CCD数据摄影测量计算
DEM地形数据	Horizontal 分辨率m	1895	1895	3000	500
	Vertical 分辨率m	100			120
	Grid number	10,568,852	10,568,852	4,218,342	151,751,140
	Data # in each grid	0.026	0.64（0.15有效）	2.16(0.5有效)	0.5
真实测量点数据	Total data #	272,931	667万	912万	7500万
	Horizontal error m	100~3000	77	445	192
	Vertical error m	100	5	60	120
Production year		2005	2009	2009	2009

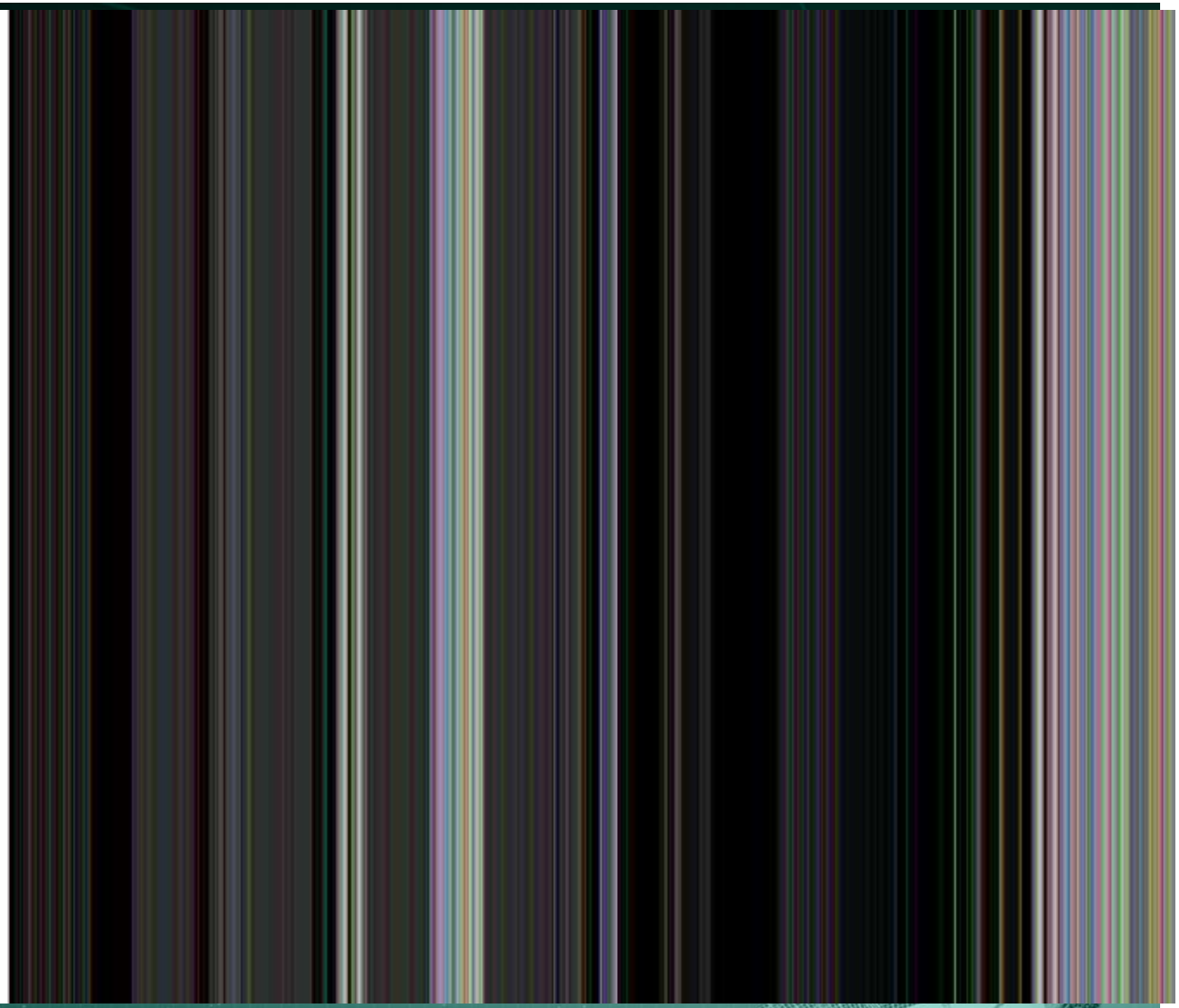


空间分辨率7m全月球mosaic 影像图

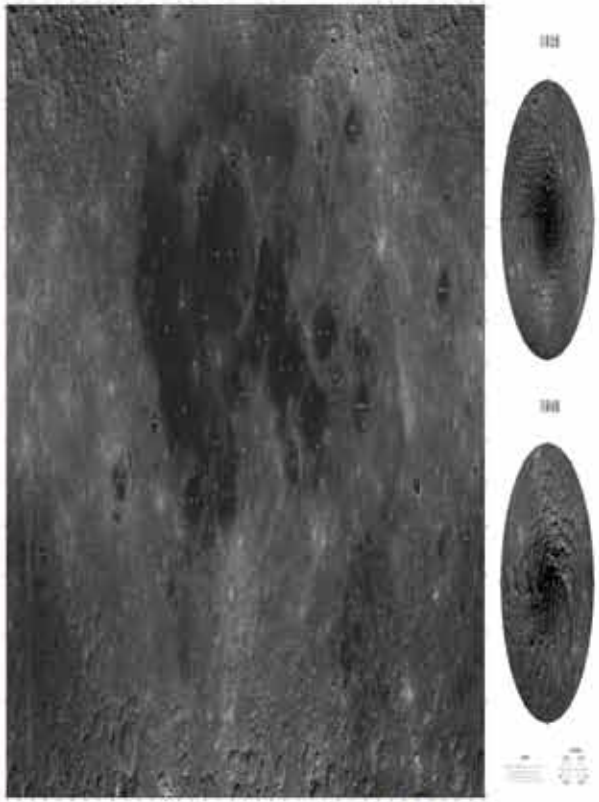
NAOC
中国科学院国家天文台
NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

嫦娥二号全月球7米分辨率影像图

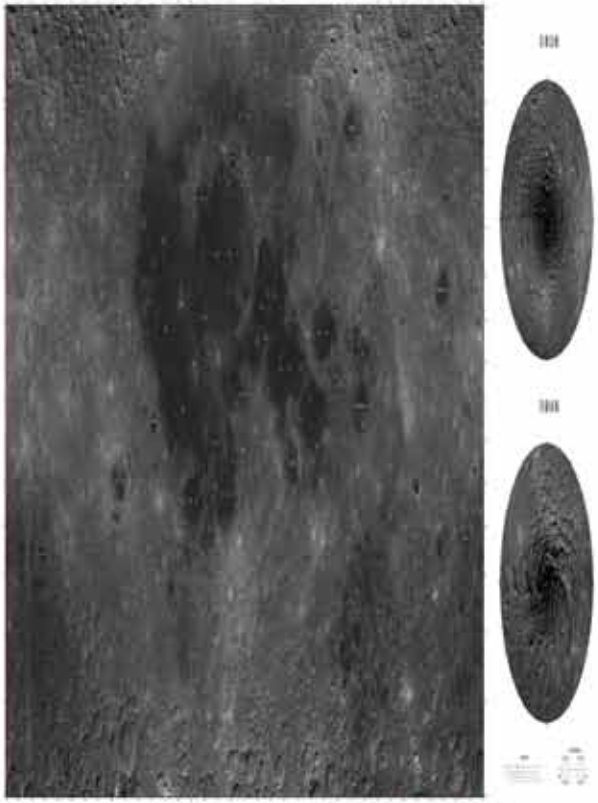




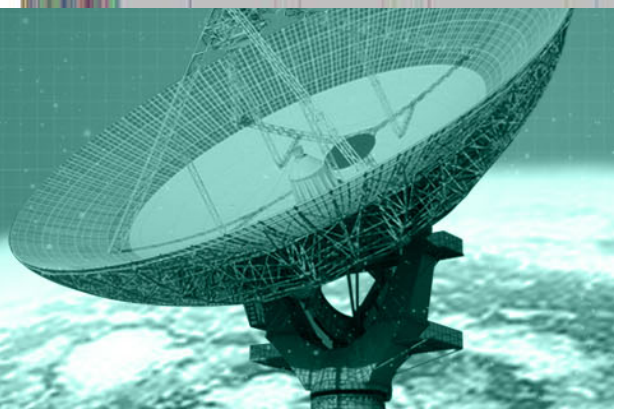
嫦娥二号全月球7米分辨率影像图

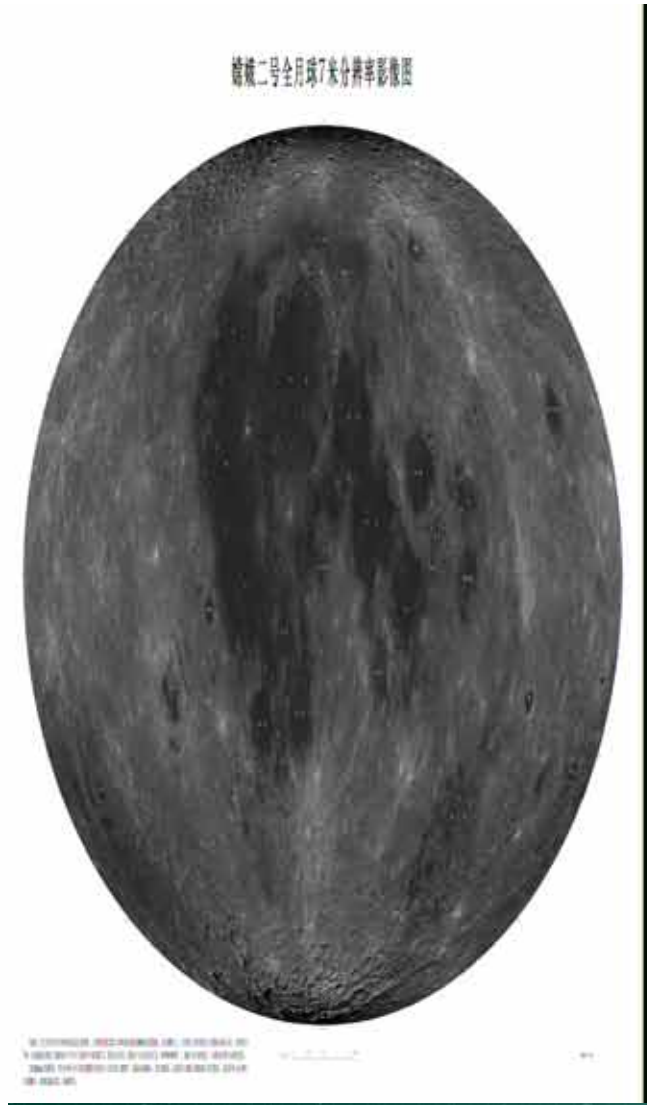


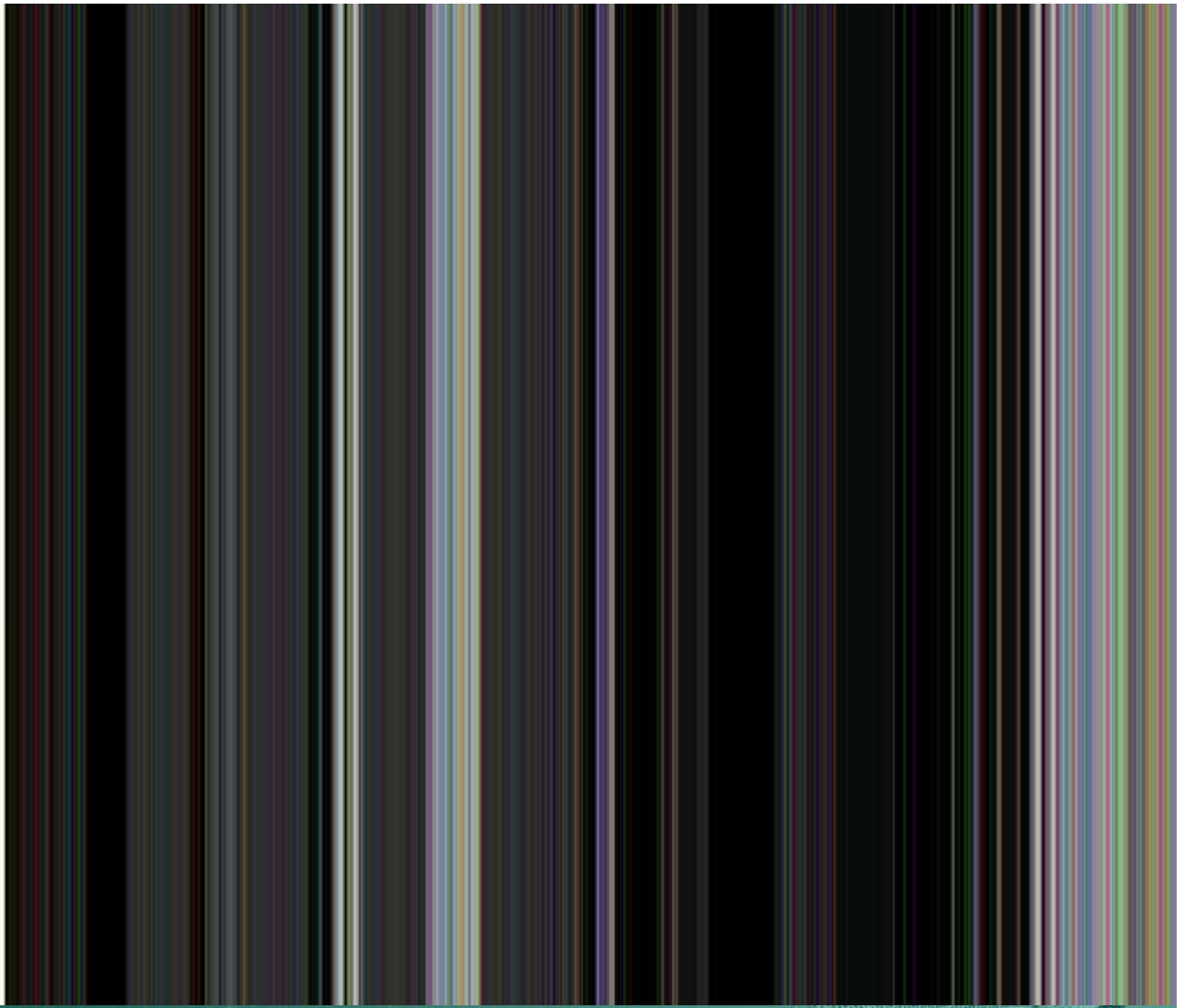
嫦娥二号全月球7米分辨率影像图



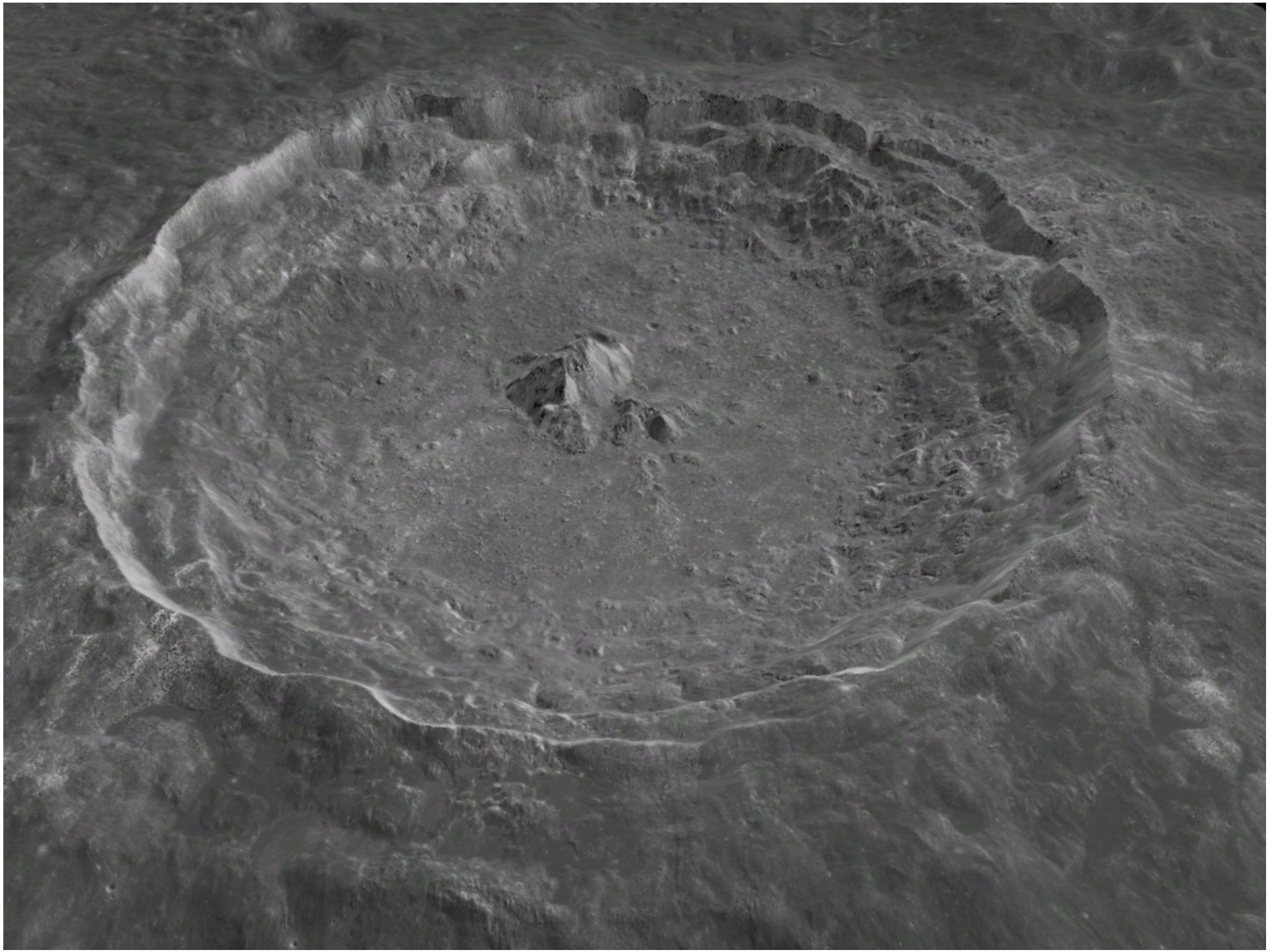
中国科学院国家天文台
NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

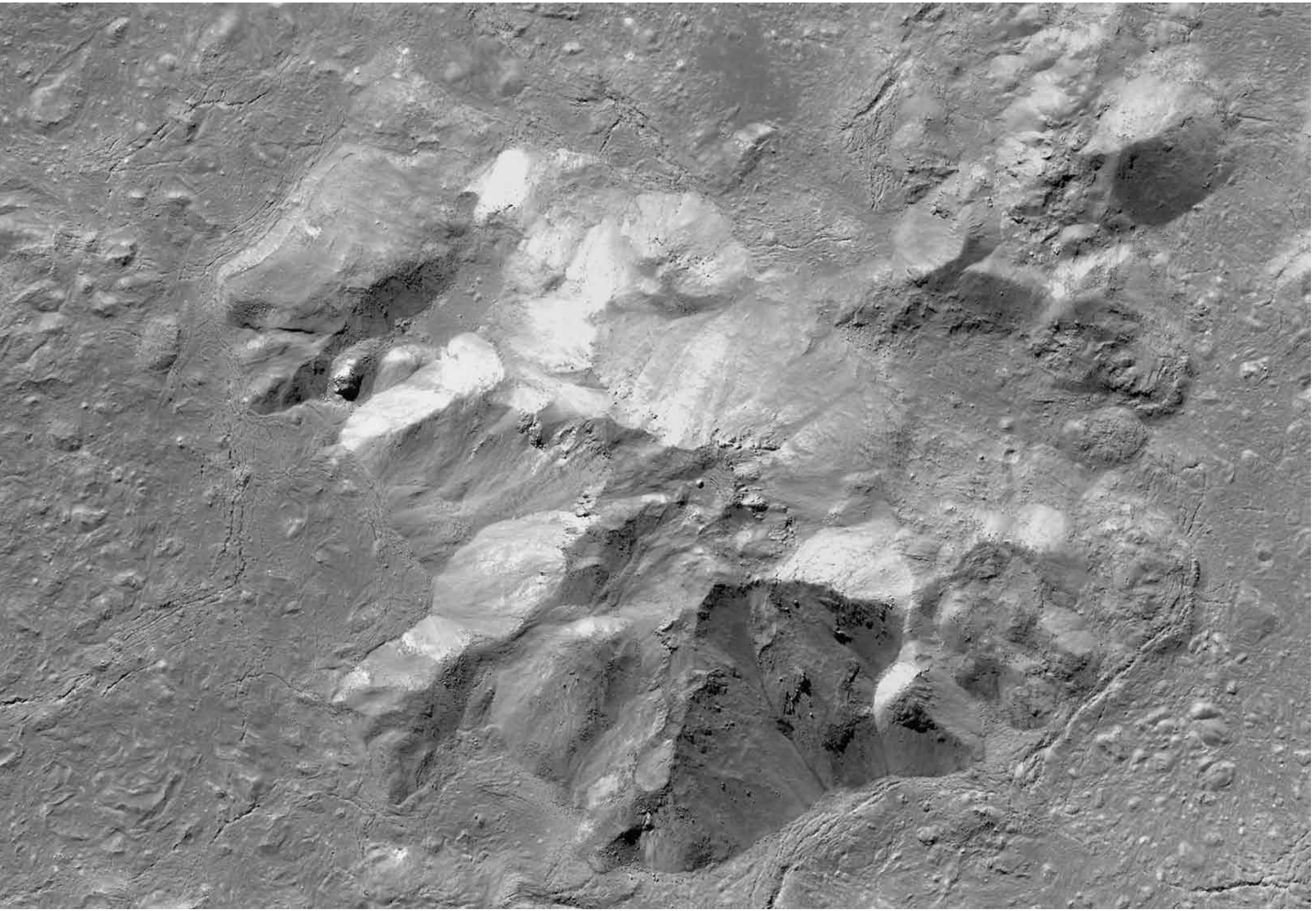



嫦娥二号全月球7米分辨率影像图




NAOC
中国科学院国家天文台
NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES





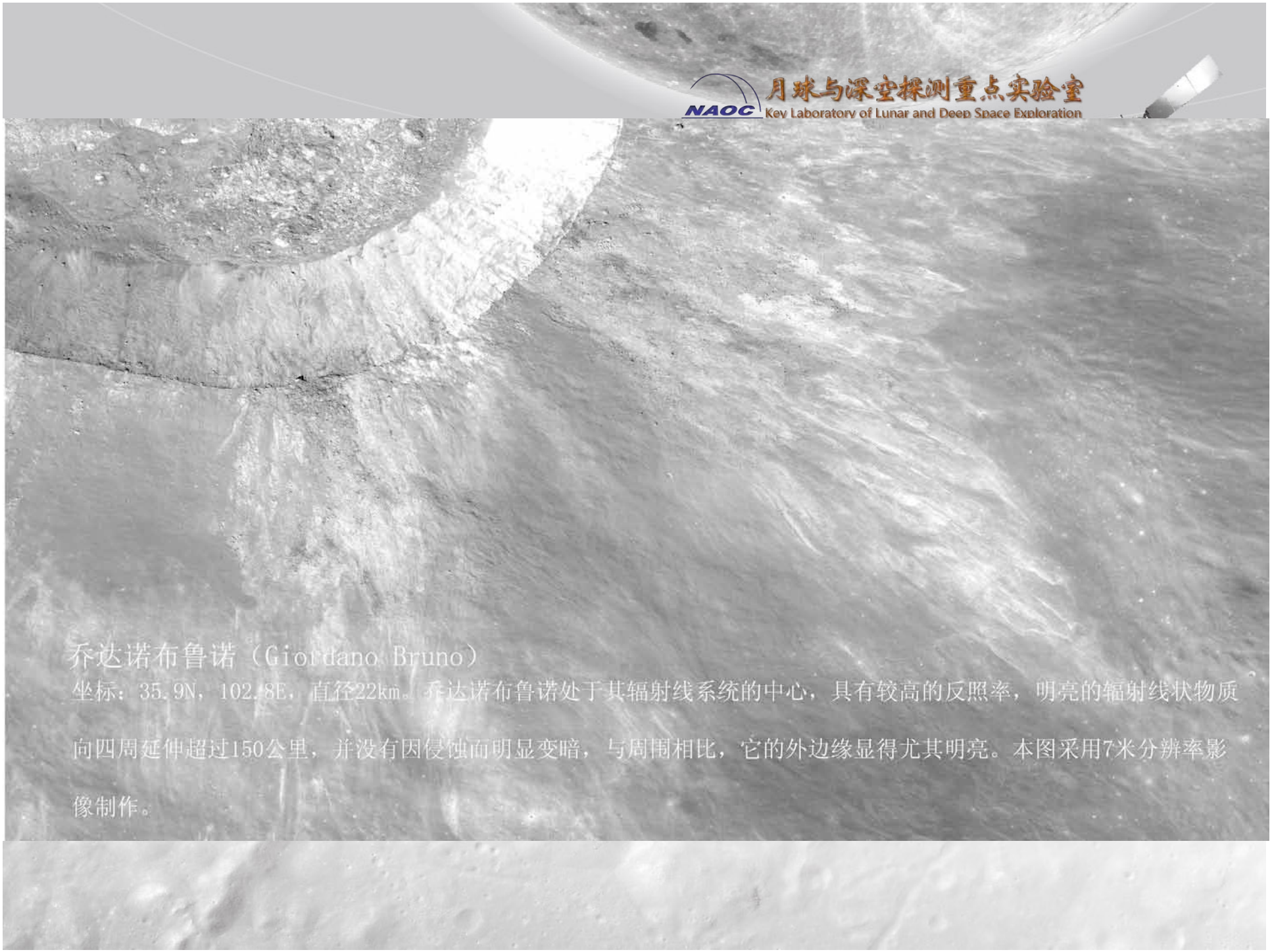
地面应用系统
GRAS

本图是位于希波克拉底环形坑西侧的环形坑链，坑链走向为西北-东南，中心坐标是151.2°W，70.4°N。本图是采用7米分辨率影像，按照6：5的比例扩编而成。（250dpi）

链形环形坑

当小天体撞击月球表面，在形成原生环形坑的同时从坑底向外抛射大量物质，这些物质通常是大块岩石或松散粘连的岩石块、月壤胶结物等，当这些物质重新溅落在月球表面时会形成一系列次生环形坑。对于在原生环形坑周围以链条形紧密排列的次生环形坑，称之为链形环形坑。

NAOC
中国科学院国家天文台
NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



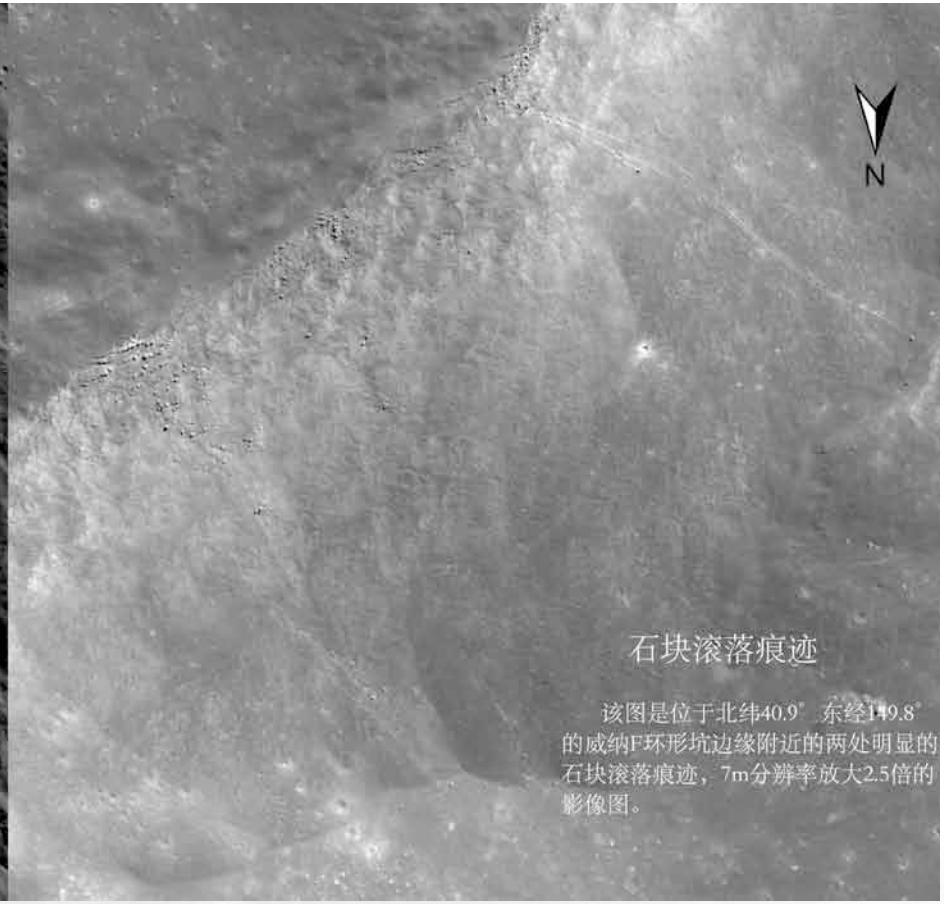
乔达诺布鲁诺（Giordano Bruno）

坐标：35.9N，102.8E，直径22km。乔达诺布鲁诺处于其辐射线系统的中心，具有较高的反照率，明亮的辐射线状物质向四周延伸超过150公里，并没有因侵蚀而明显变暗，与周围相比，它的外边缘显得尤其明亮。本图采用7米分辨率影像制作。

（十一）石块群

月面大石块多密集成群的分布于撞击坑、辐射纹、月溪、月谷、裂隙等地形单元附近区域内。

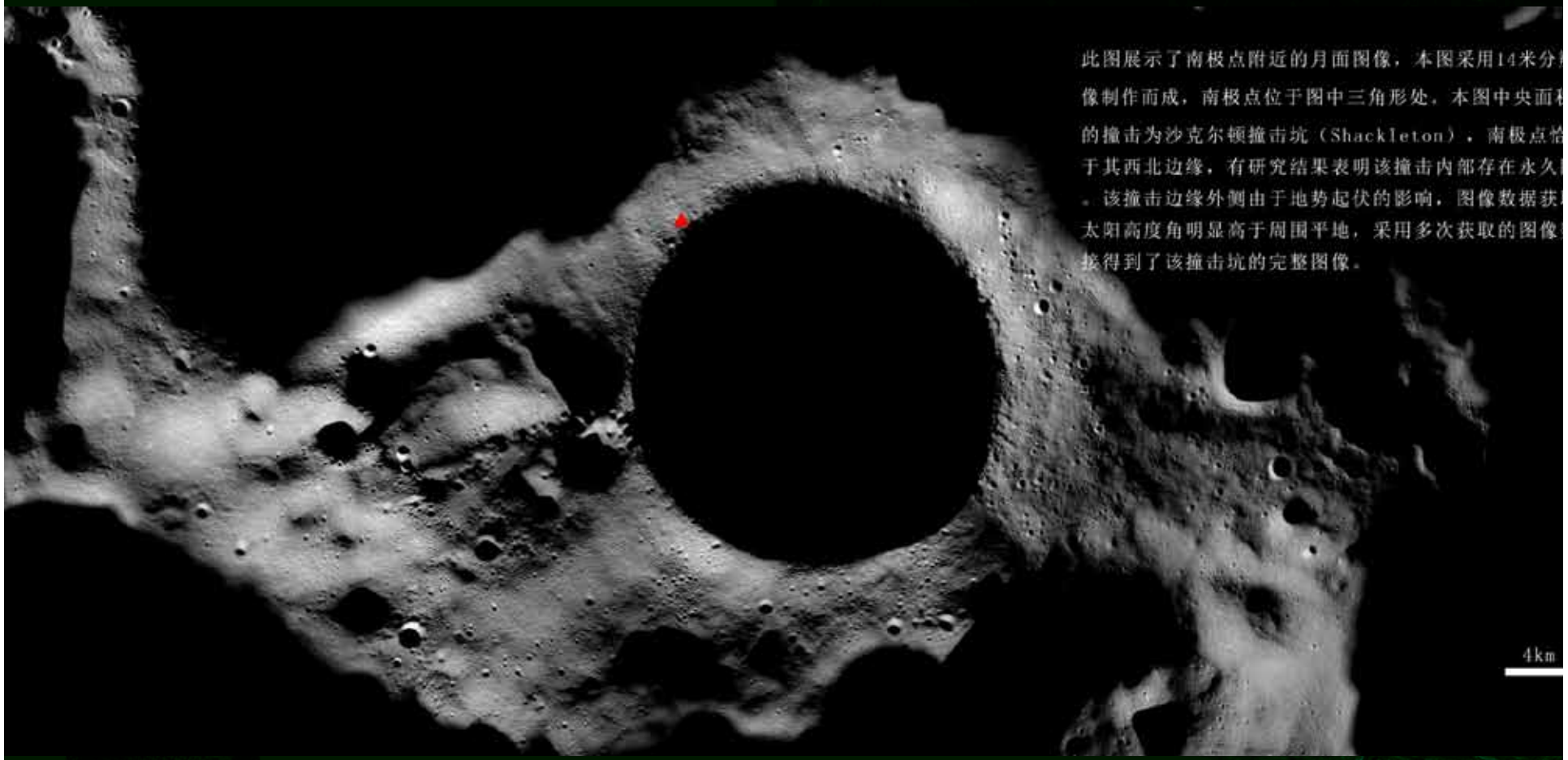
该图是7m分辨率下的大石块分布。位于南纬78.5° 东经23.5° 直径约30km的撞击坑外坑壁。



石块滚落痕迹

该图是位于北纬40.9° 东经149.8° 的威纳F环形坑边缘附近的两处明显的石块滚落痕迹，7m分辨率放大2.5倍的影像图。

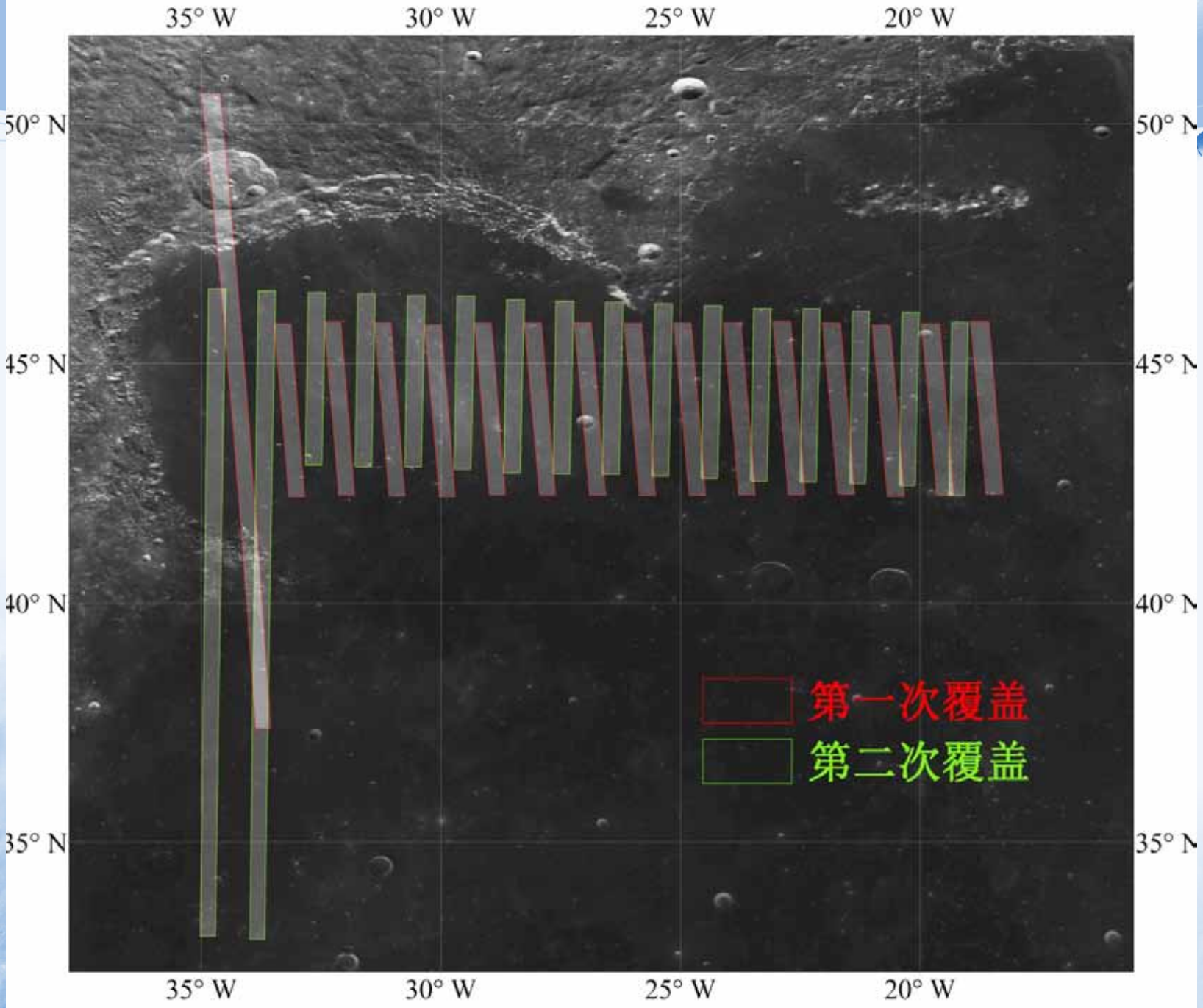
地面应用系统
GRAS



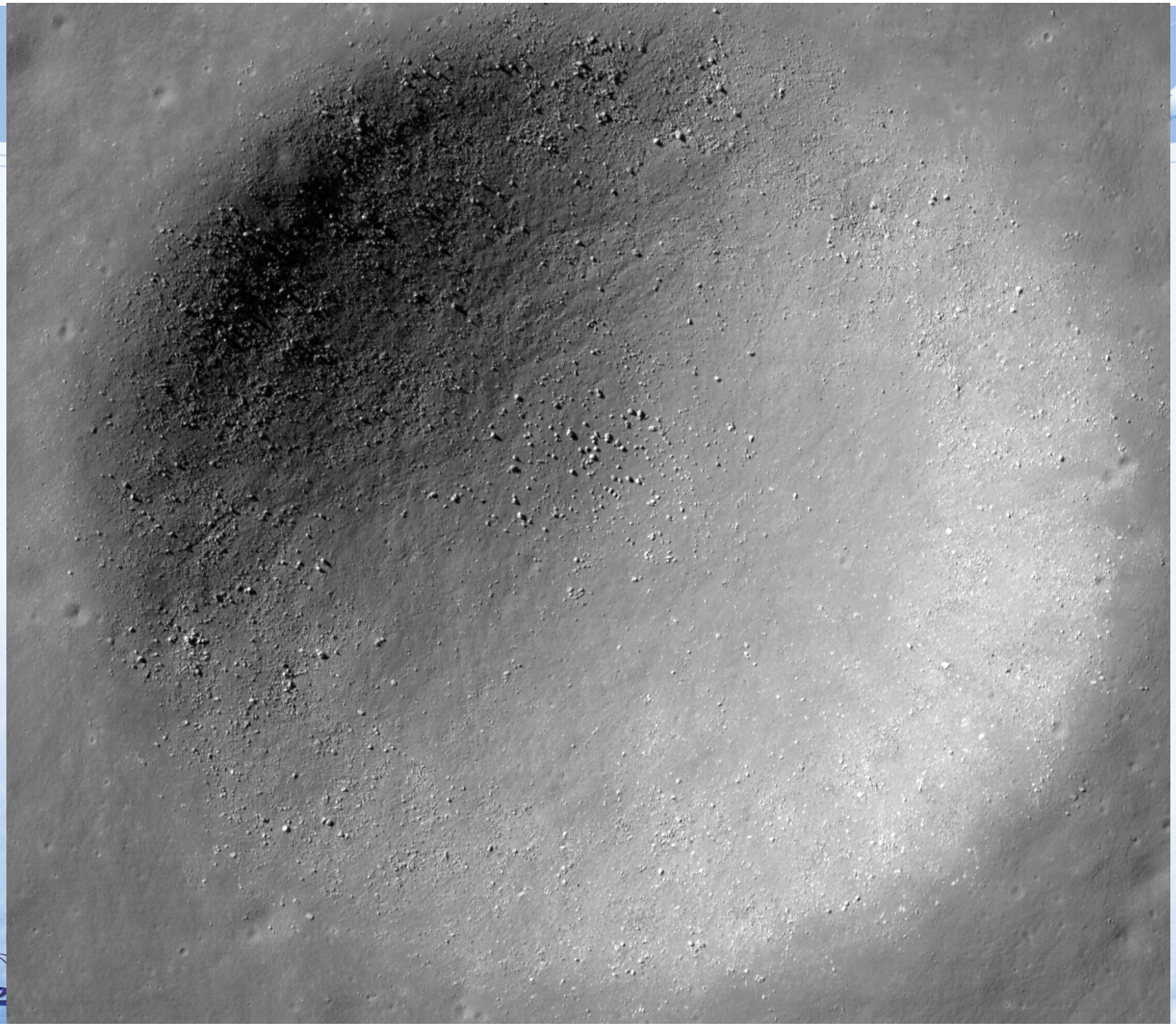
此图展示了南极点附近的月面图像，本图采用14米分
像制作而成，南极点位于图中三角形处。本图中央面
的撞击为沙克尔顿撞击坑（Shackleton），南极点
于其西北边缘，有研究结果表明该撞击内部存在永久
。该撞击边缘外侧由于地势起伏的影响，图像数据获
太阳高度角明显高于周围平地，采用多次获取的图像
接得到了该撞击坑的完整图像。

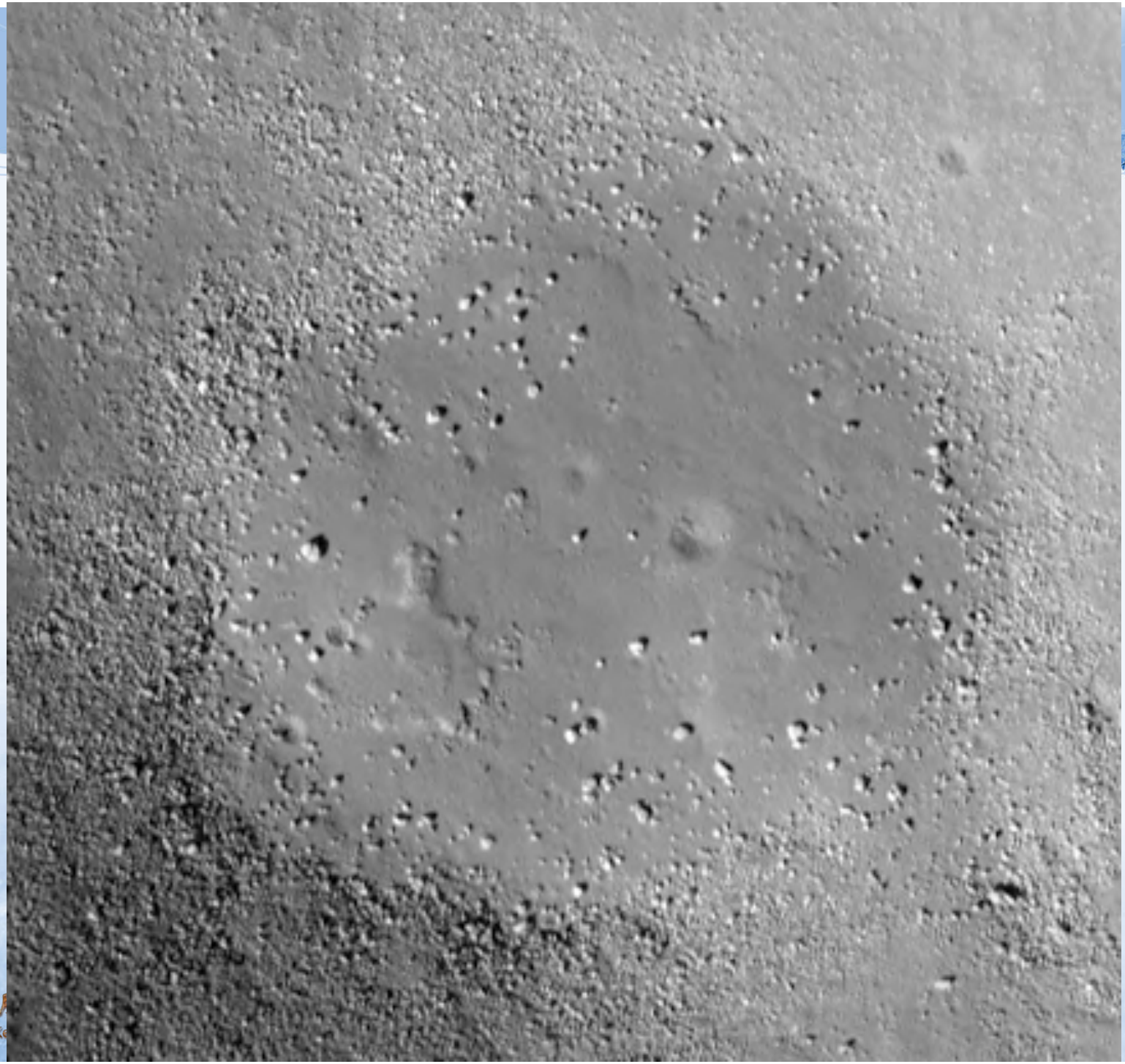
4km

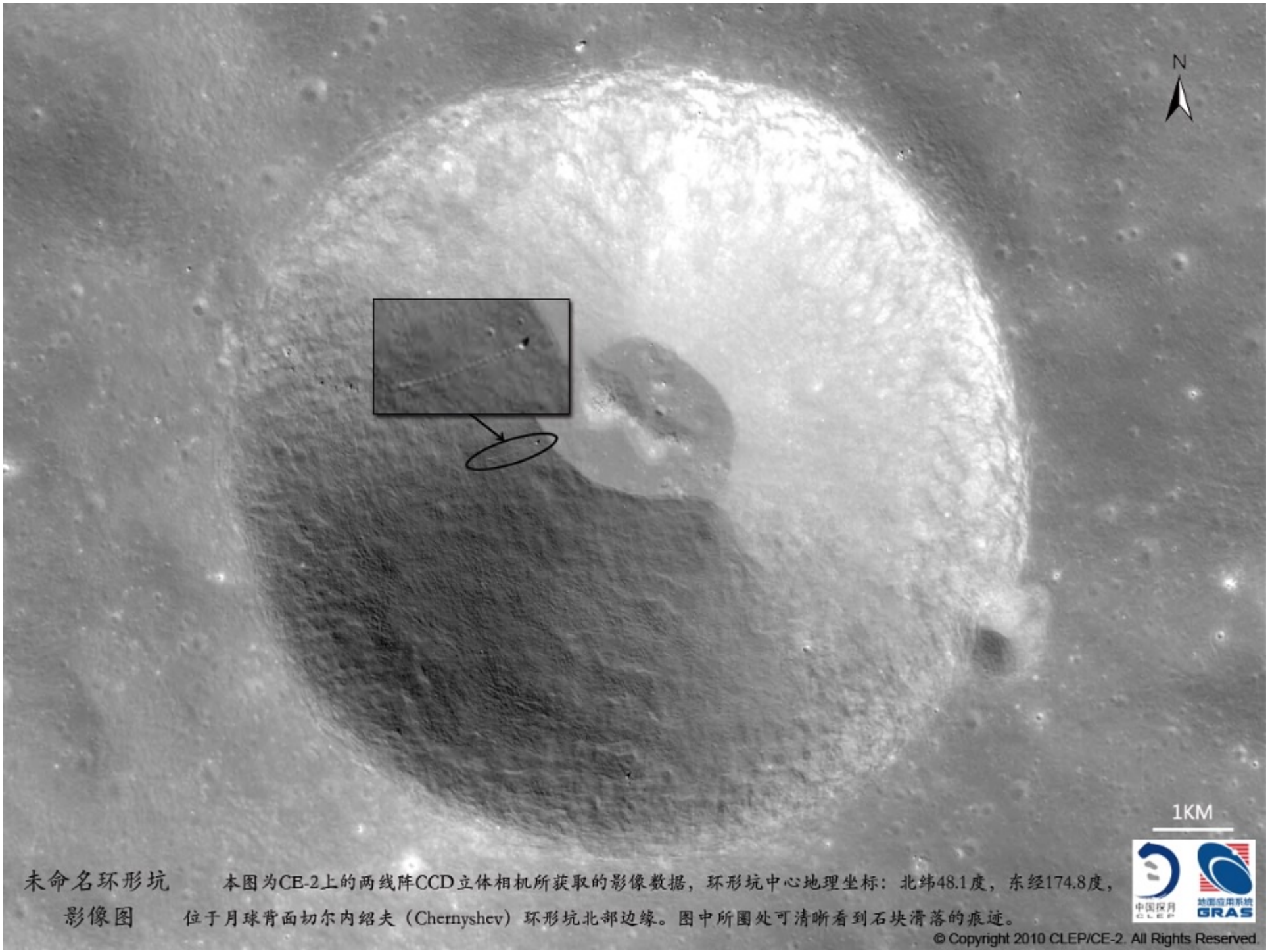
NAOC
中国科学院国家天文台
NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES


35° W
30° W
25° W
20° W
50° N
45° N
40° N
35° N
第一次覆盖
第二次覆盖


虹湾局部三维景观图
虹湾局部三维景观图由嫦娥二号CCD
立体相机在距月面19千米轨道上获得的影



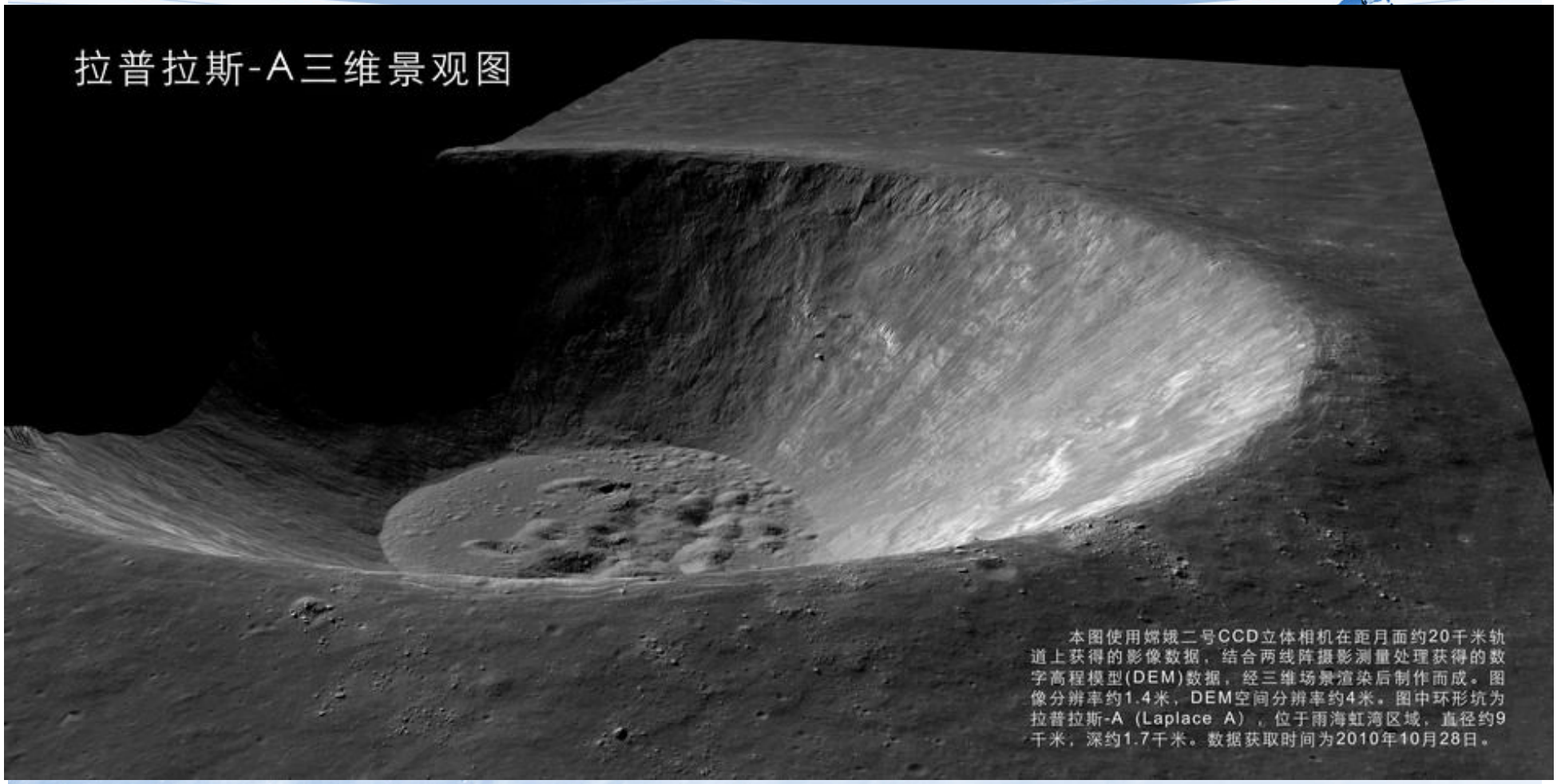




未命名环形坑影像图

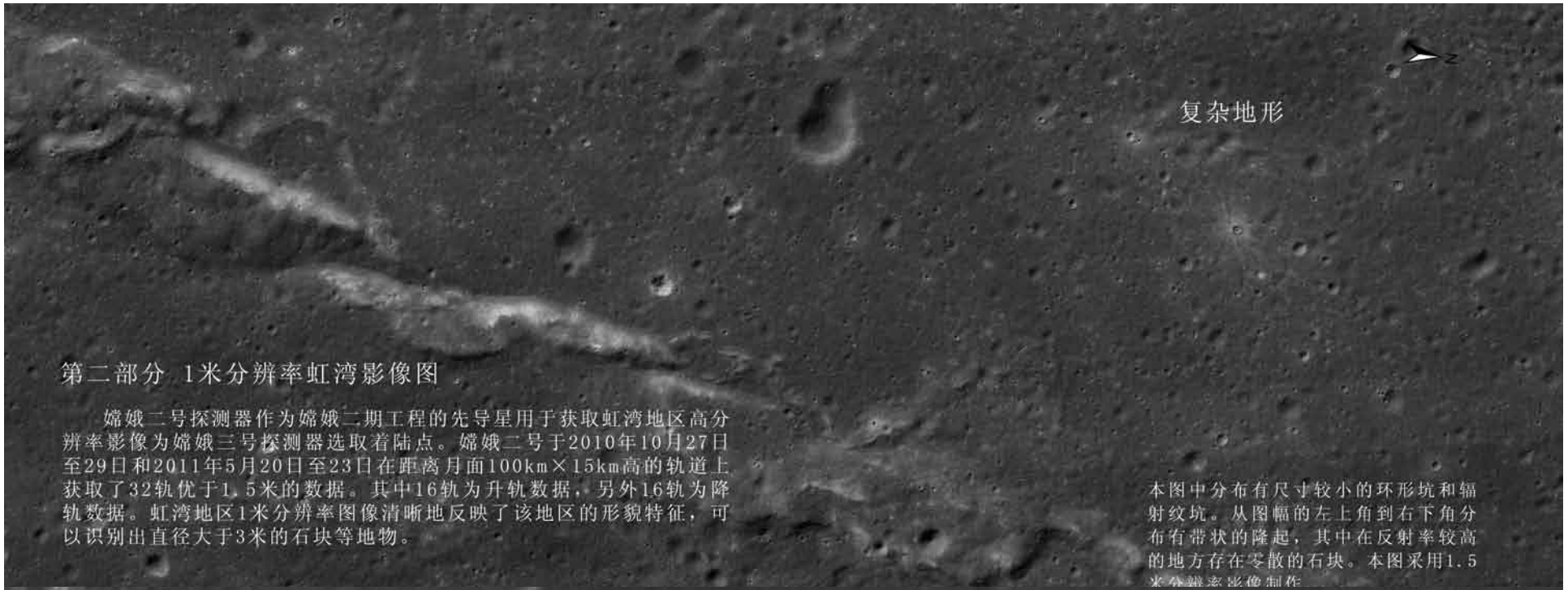
本图为CE-2上的两线阵CCD立体相机所获取的影像数据，环形坑中心地理坐标：北纬48.1度，东经174.8度，位于月球背面切尔内绍夫（Chernyshev）环形坑北部边缘。图中所圈处可清晰看到石块滑落的痕迹。

拉普拉斯-A三维景观图



本图使用嫦娥二号CCD立体相机在距月面约20千米轨道上获得的影像数据，结合两线阵摄影测量处理获得的数字高程模型(DEM)数据，经三维场景渲染后制作而成。图像分辨率约1.4米，DEM空间分辨率约4米。图中环形坑为拉普拉斯-A（Laplace A），位于雨海虹湾区域，直径约9千米，深约1.7千米。数据获取时间为2010年10月28日。

NAOC 月球与深空探测重点实验室
Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration

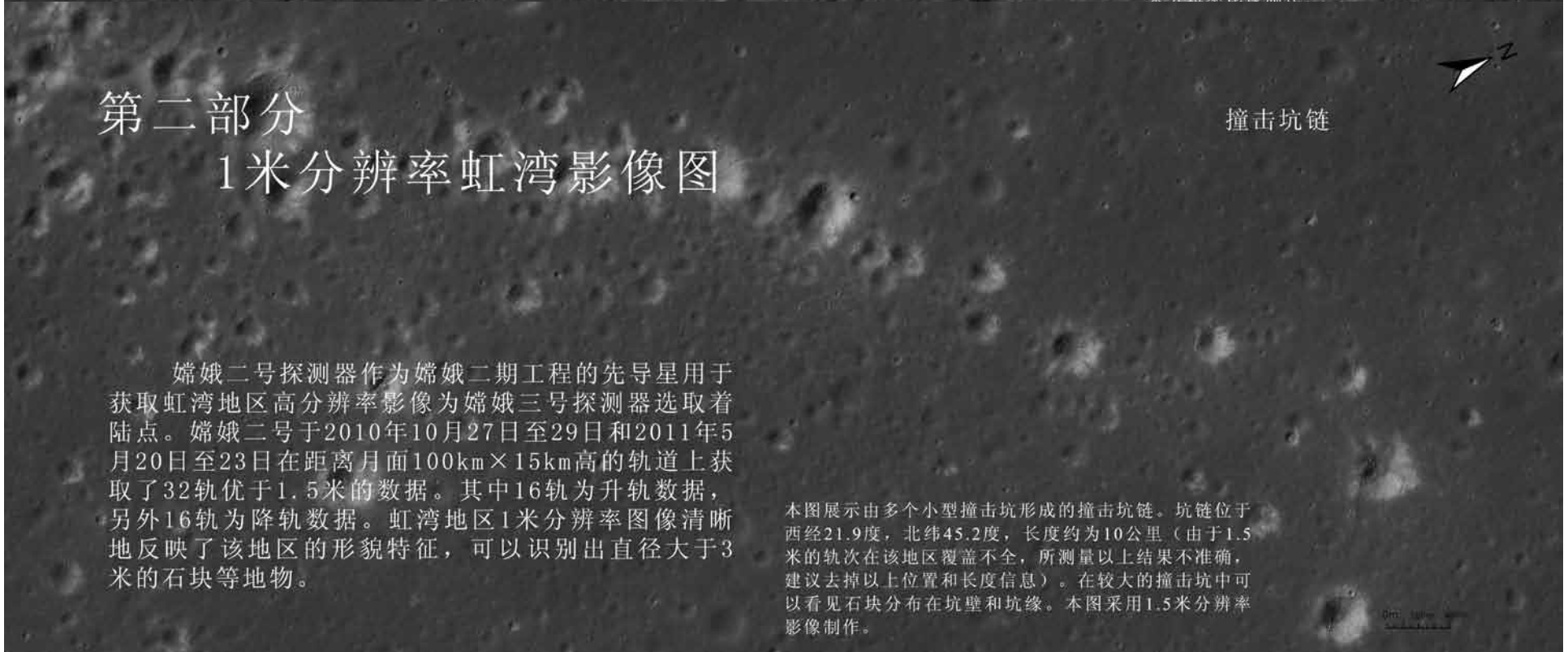


复杂地形

本图中分布有尺寸较小的环形坑和辐射纹坑。从图幅的左上角到右下角分布有带状的隆起，其中在反射率较高的地方存在零散的石块。本图采用1.5米分辨率影像制作。

第二部分 1米分辨率虹湾影像图

嫦娥二号探测器作为嫦娥二期工程的先导星用于获取虹湾地区高分辨率影像为嫦娥三号探测器选取着陆点。嫦娥二号于2010年10月27日至29日和2011年5月20日至23日在距离月面100km×15km高的轨道上获取了32轨优于1.5米的数据。其中16轨为升轨数据，另外16轨为降轨数据。虹湾地区1米分辨率图像清晰地反映了该地区的形貌特征，可以识别出直径大于3米的石块等地物。



第二部分
1米分辨率虹湾影像图

嫦娥二号探测器作为嫦娥二期工程的先导星用于获取虹湾地区高分辨率影像为嫦娥三号探测器选取着陆点。嫦娥二号于2010年10月27日至29日和2011年5月20日至23日在距离月面100km×15km高的轨道上获取了32轨优于1.5米的数据。其中16轨为升轨数据，另外16轨为降轨数据。虹湾地区1米分辨率图像清晰地反映了该地区的形貌特征，可以识别出直径大于3米的石块等地物。

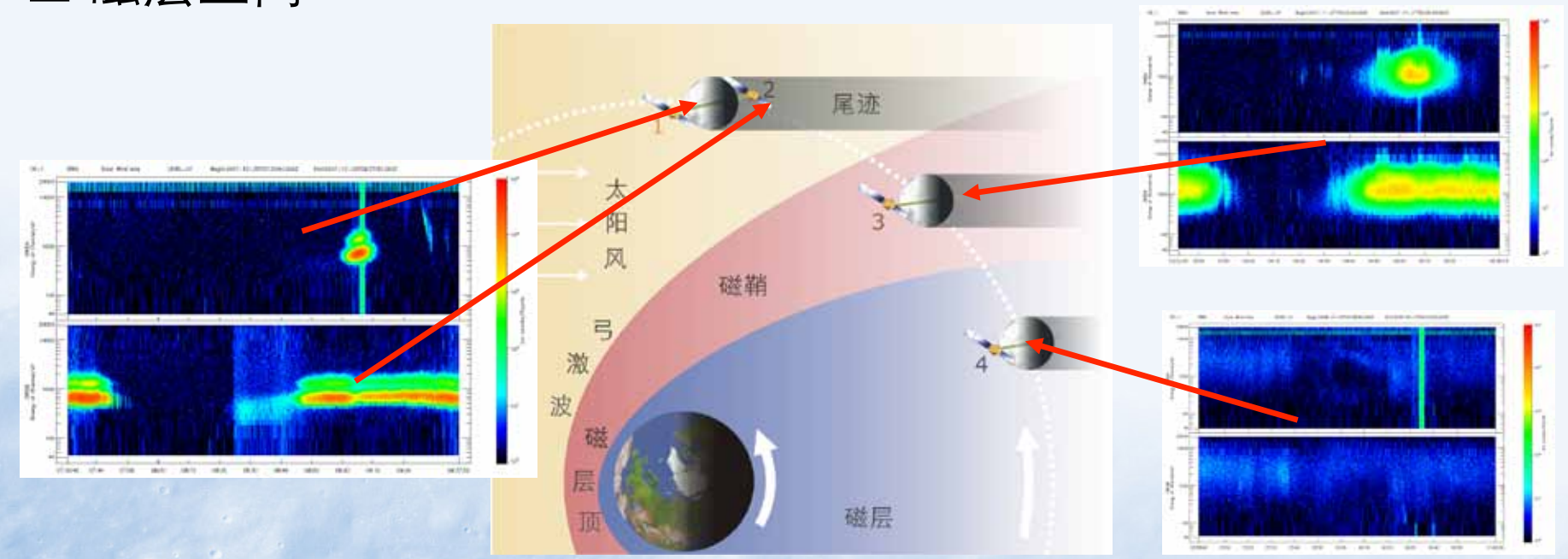
撞击坑链

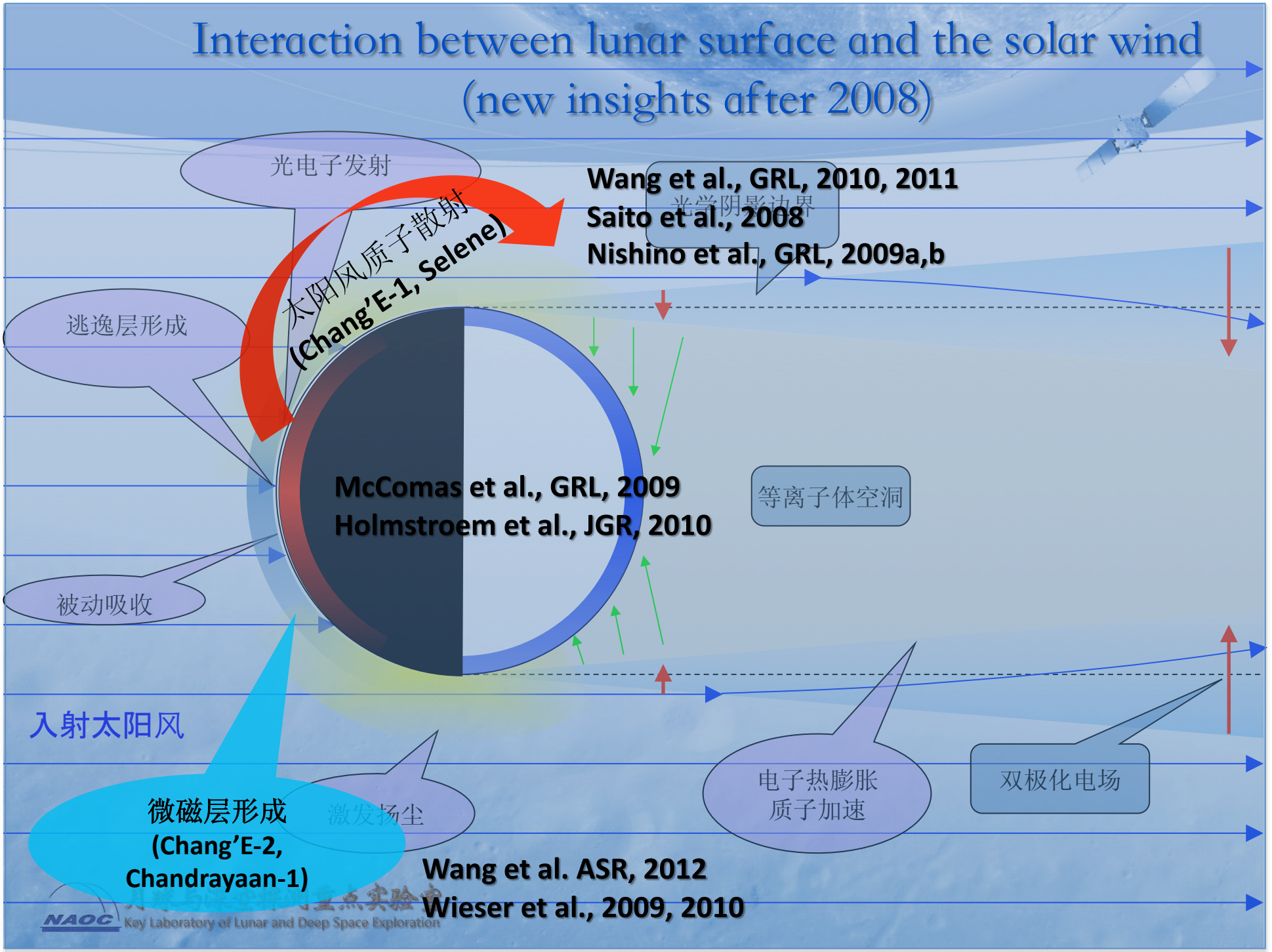
本图展示由多个小型撞击坑形成的撞击坑链。坑链位于西经21.9度，北纬45.2度，长度约为10公里（由于1.5米的轨次在该地区覆盖不全，所测量以上结果不准确，建议去掉以上位置和长度信息）。在较大的撞击坑中可以看见石块分布在坑壁和坑缘。本图采用1.5米分辨率影像制作。

——月球空间环境探测与研究

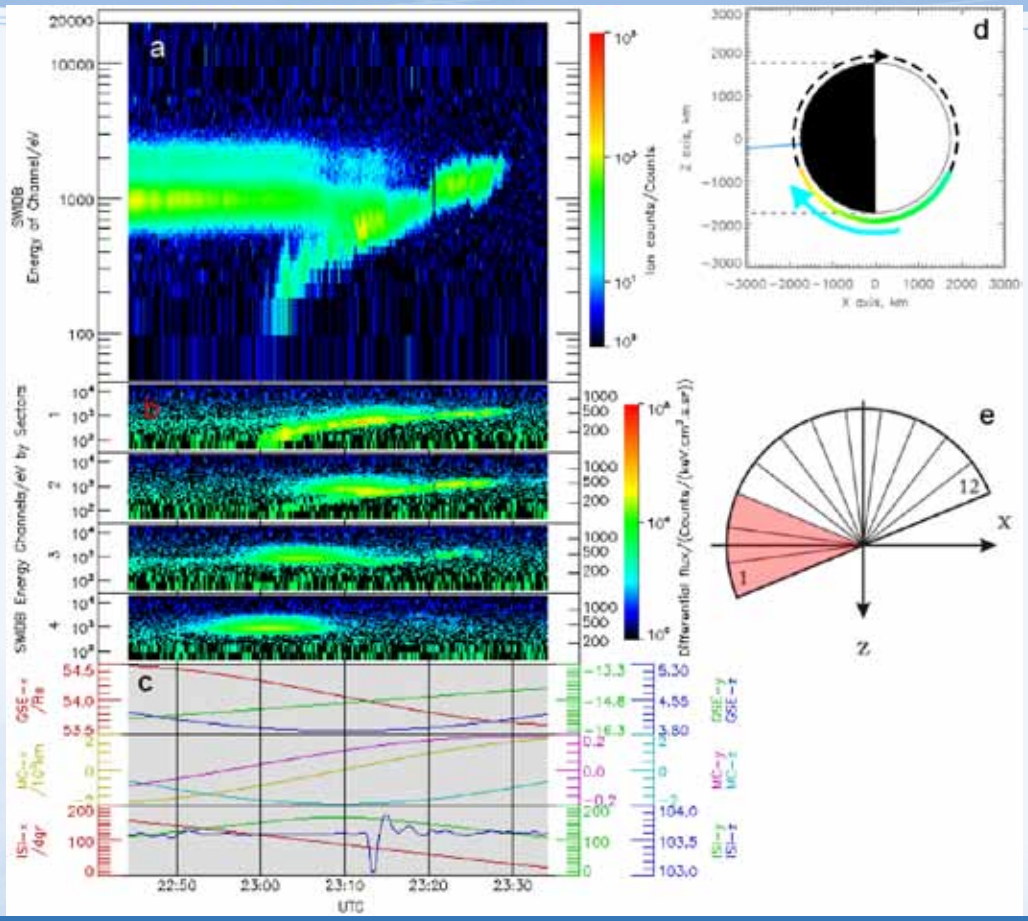
- 粒子种类：高能粒子和太阳风离子

- 行星际空间——纯净太阳风离子
- 磁鞘空间
- 磁层空间




Interaction between lunar surface and the solar wind
(new insights after 2008)
光电子发射
太阳风质子散射
(Chang'E-1, Selene)
Wang et al., GRL, 2010, 2011
Saito et al., 2008
Nishino et al., GRL, 2009a,b
光学阴影边界
逃逸层形成
McComas et al., GRL, 2009
Holmstroem et al., JGR, 2010
等离子体空洞
被动吸收
入射太阳风
微磁层形成
(Chang'E-2,
Chandrayaan-1)
激发扬尘
Wang et al. ASR, 2012
Wieser et al., 2009, 2010
电子热膨胀
质子加速
双极化电场
NAOC
Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration

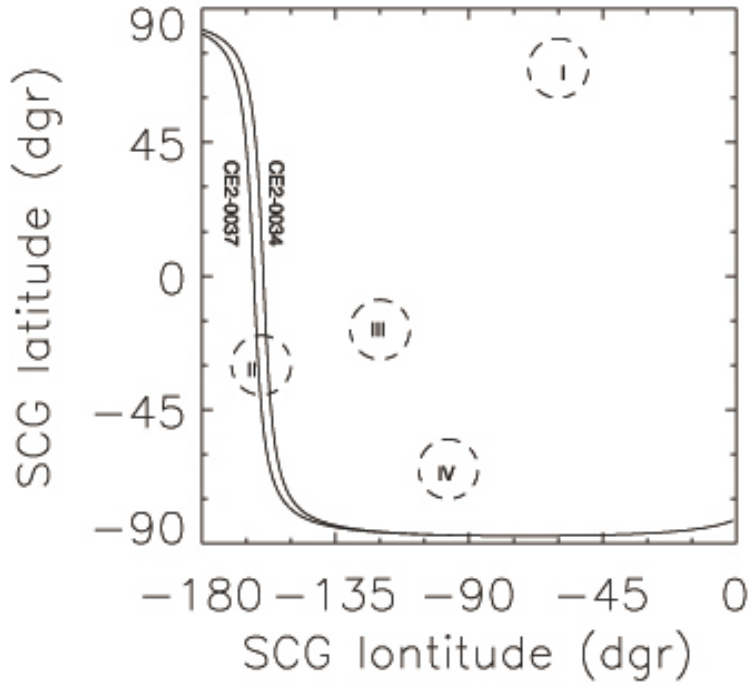
事件的研究工作



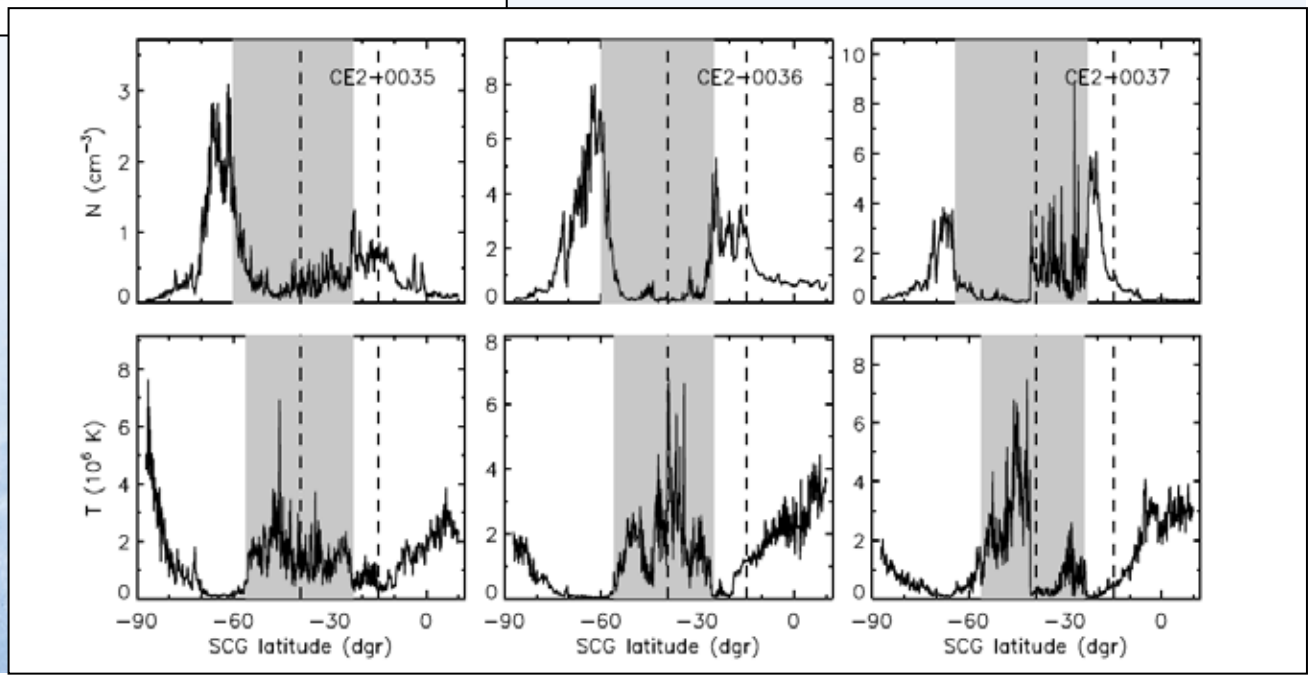
日夜交界面加速：

在卫星运行至两极日夜交界面（晨昏线）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。

Geophysical research letter, 2010

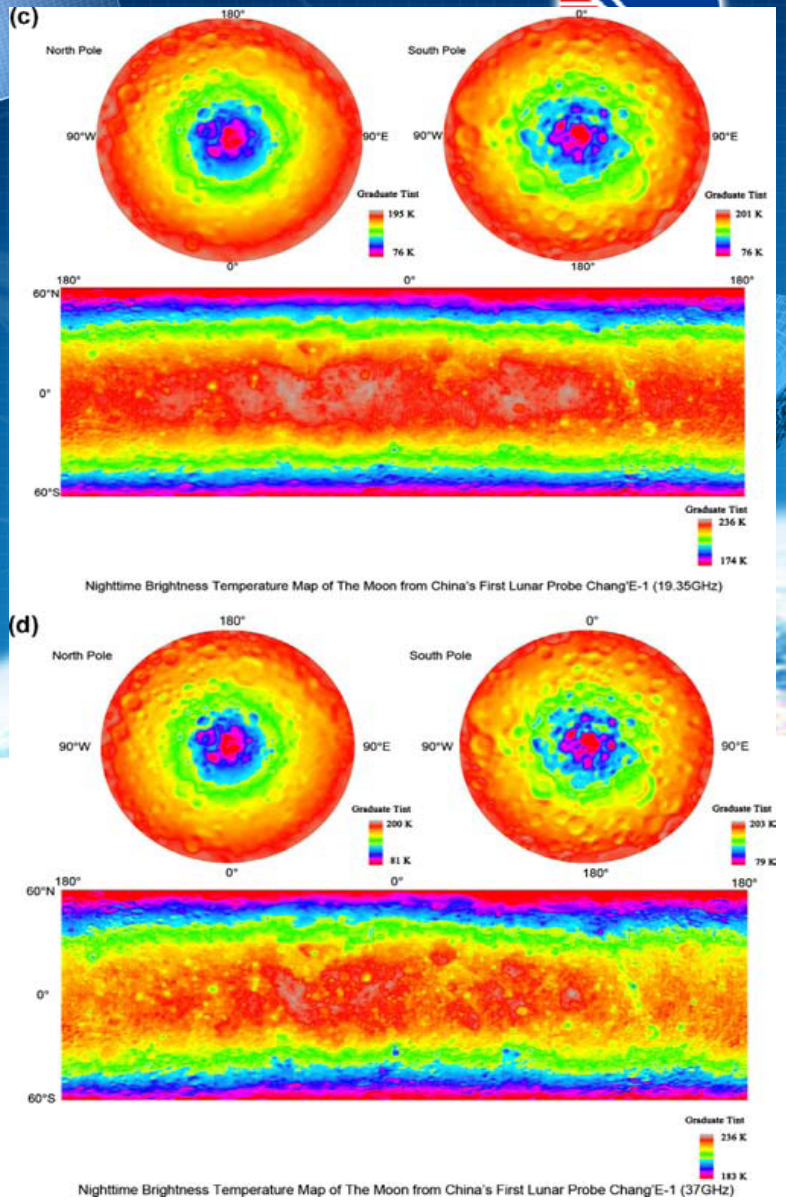


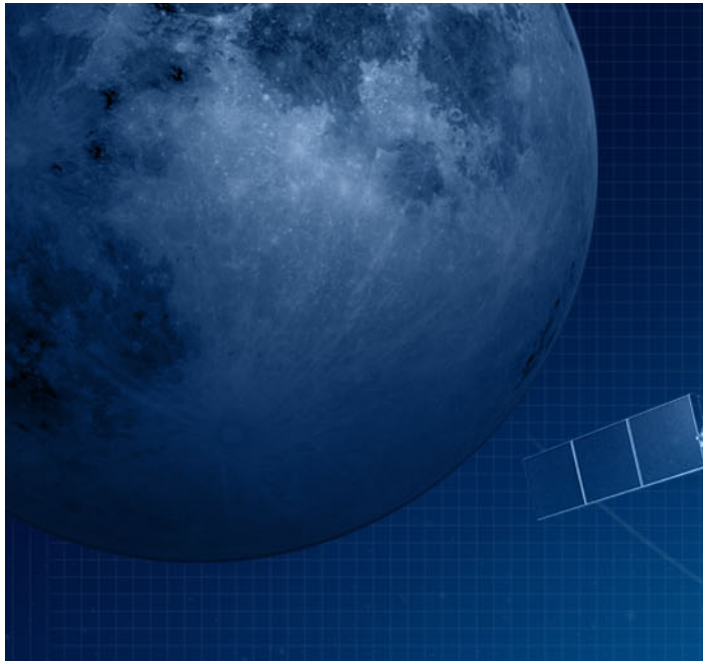
CE-2在100km轨道高度首次检测到月表微磁层的存在。

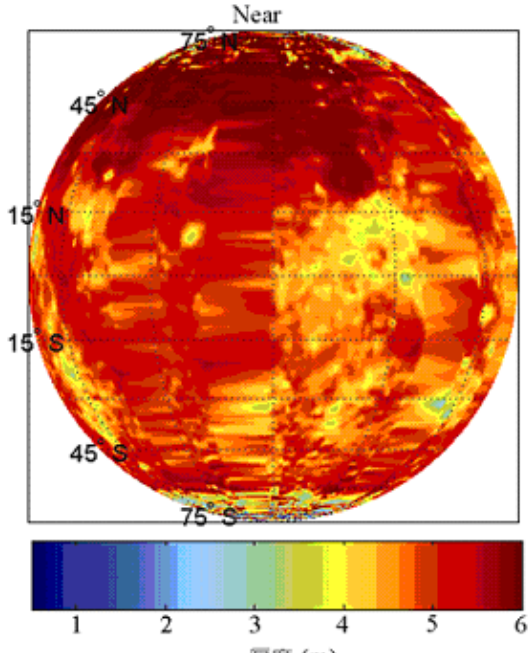


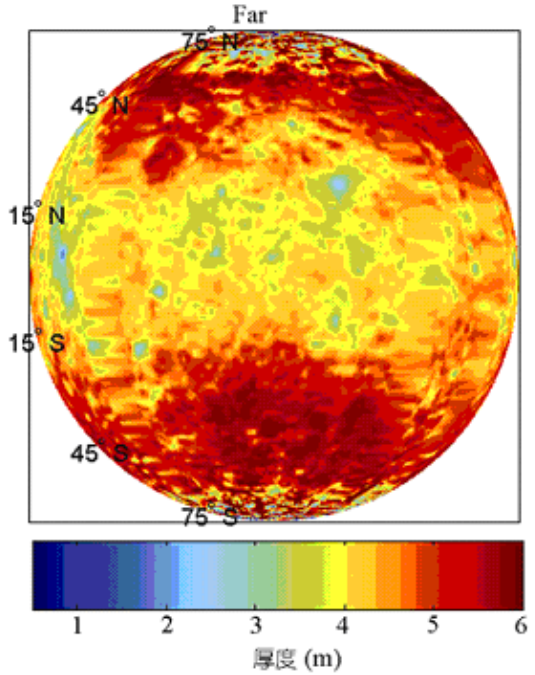
——月球微波探测数据应用与研究

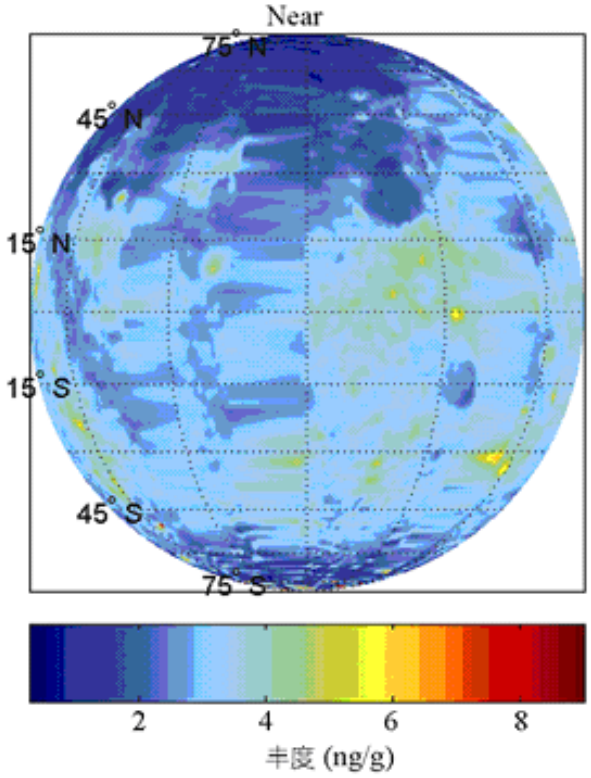
- 数据覆盖：数据累积时间嫦娥一号约2642小时，嫦娥二号约4000多小时，数据多次覆盖了全月球表面。
- 频率：3.0GHz、7.8GHz、19.35GHz和37.0GHz四个频率的微波辐射亮温。
- 是国际上首次采用被动微波遥感技术测量全月球微波辐射信息，进而探测月壤特性，反演月壤厚度。
- 目前已处理得到全月球不同光照条件的微波辐射亮温，在此基础上进一步反演月壤厚度，评估氦-3资源。

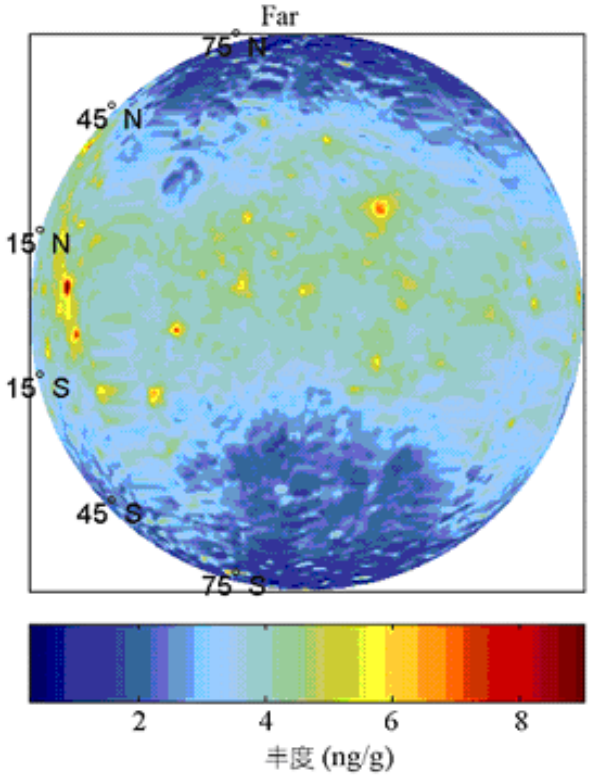





Near
75° N
45° N
15° N
15° S
45° S
75° S
1
2
3
4
5
6


Far
75° N
45° N
15° N
15° S
45° S
75° S
1
2
3
4
5
6
厚度 (m)

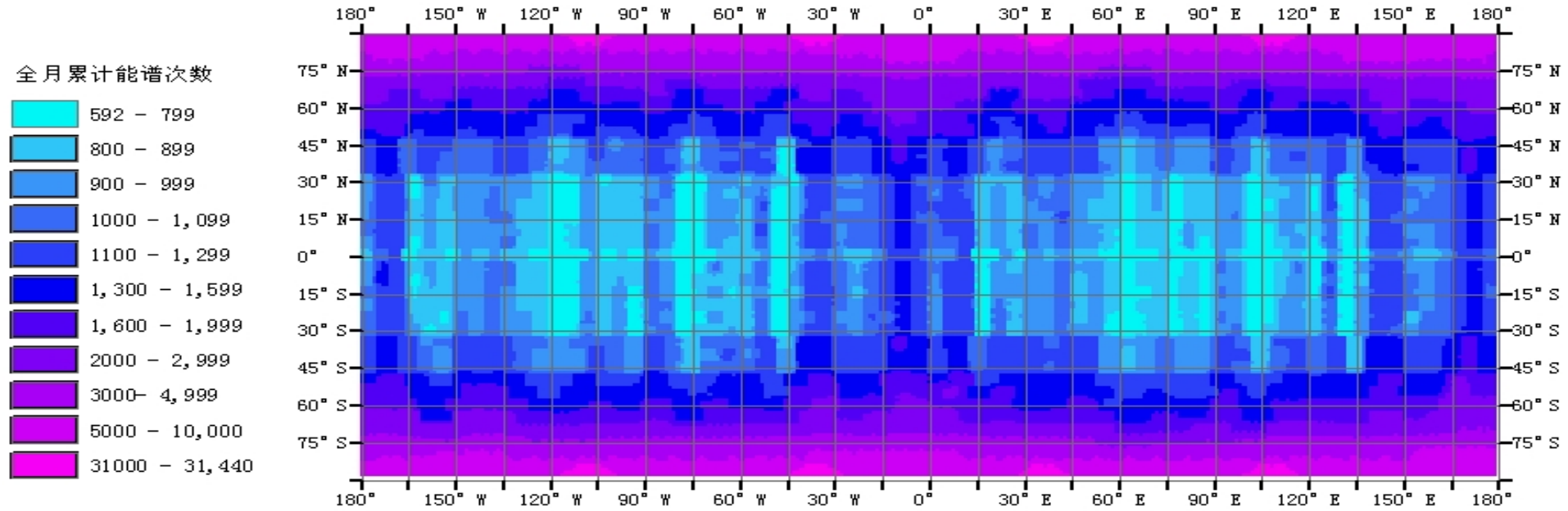

Near
75° N
45° N
15° N
15° S
45° S
75° S
2
4
6
8
丰度 (ng/g)

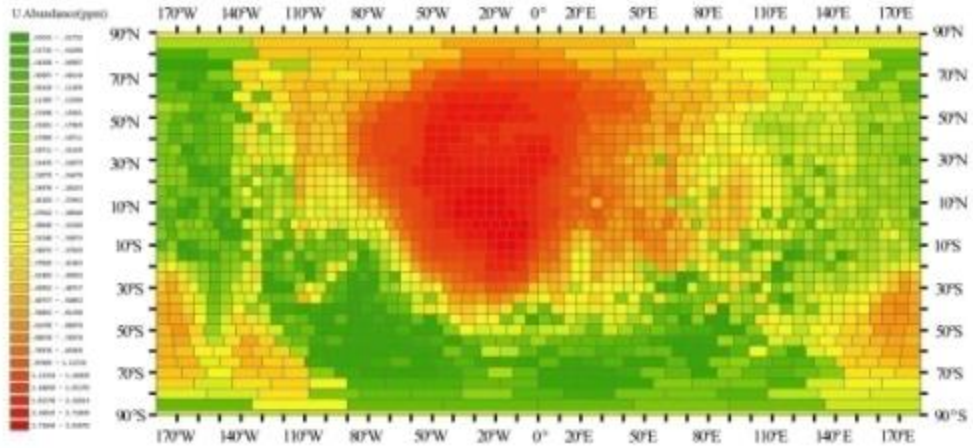

Far
75° N
45° N
15° N
15° S
45° S
75° S
2
4
6
8
丰度 (ng/g)

1. 月表元素含量数据

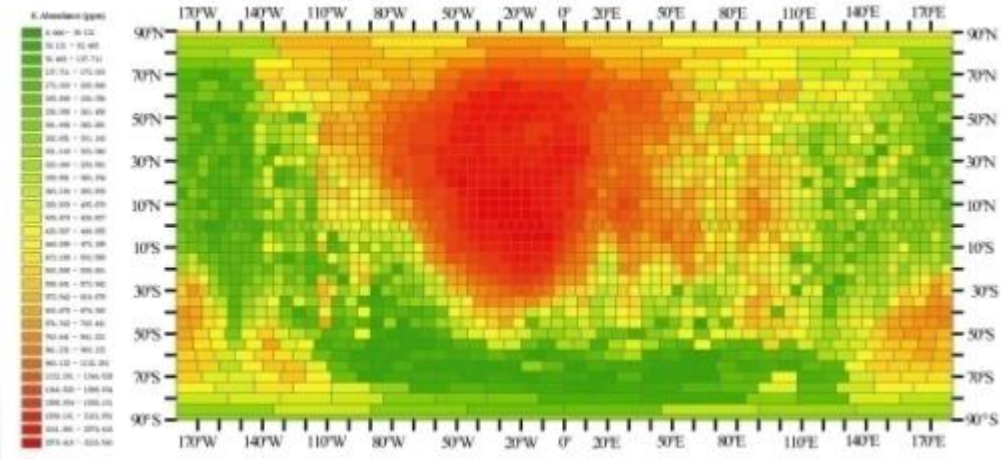
伽马射线谱仪获得铀、钍、钾的全月球含量数据和分布图

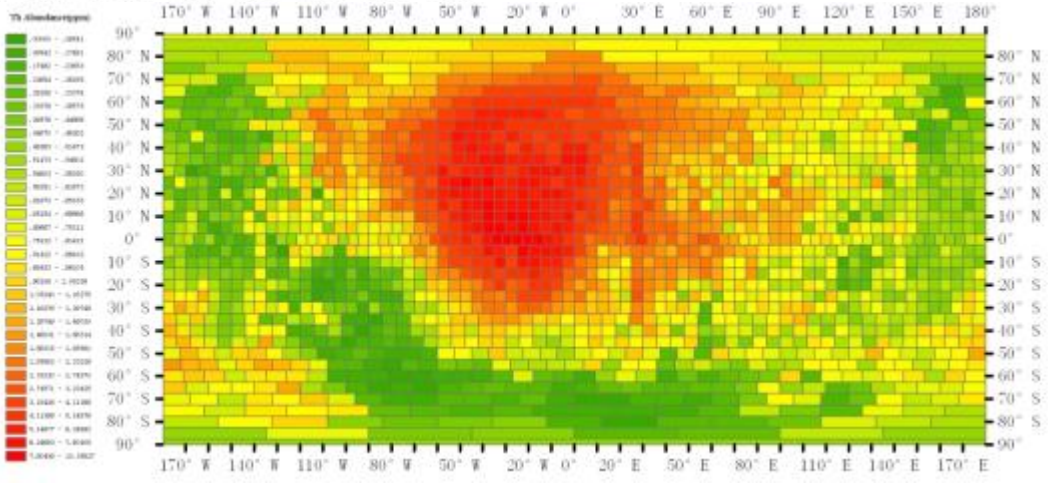
- **嫦娥一号卫星伽马射线谱仪共获取了1103轨有效探测数据，累计时间约2120.8小时。嫦娥二号累计时间比一号多一倍，达4000多小时。**
- **U、Th、K等3种元素能够解译出全月球分布和含量，Mg、Al、Si、Fe、Ti等元素只能解译出区域含量与分布数据。**




U Abundance(ppm)
170°W 140°W 110°W 80°W 50°W 20°W 0° 20°E 50°E 80°E 110°E 140°E 170°E
90°N 70°N 50°N 30°N 10°N 10°S 30°S 50°S 70°S 90°S

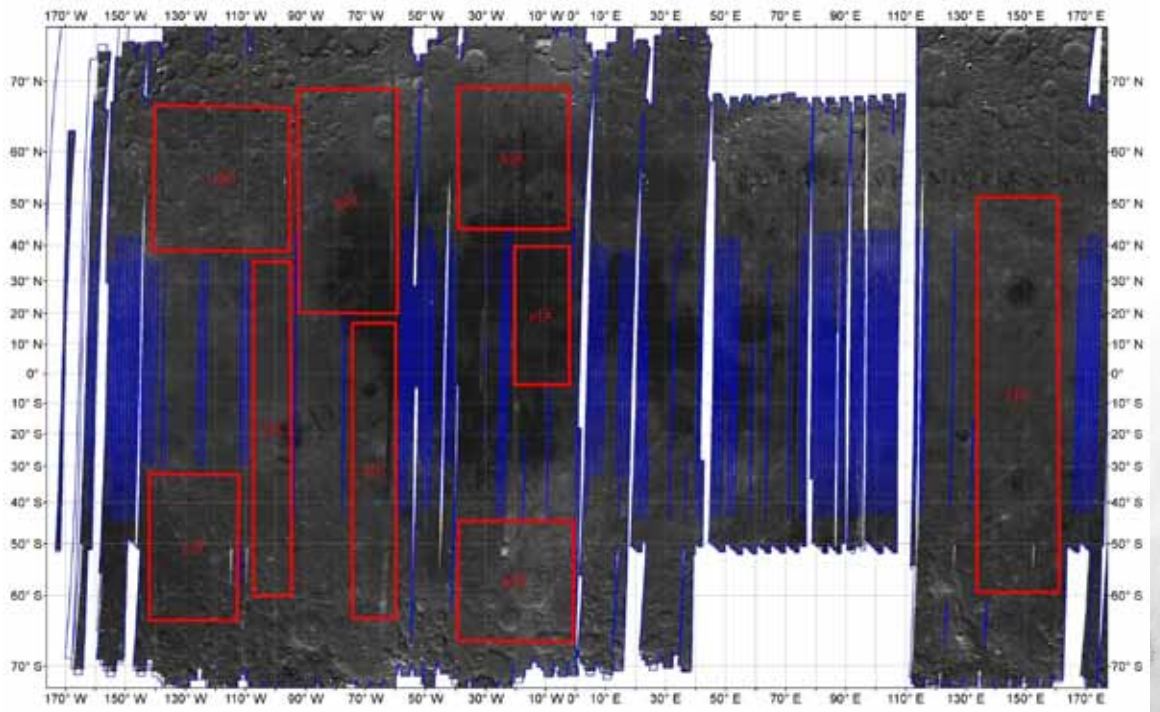

NAOC
月球与深空探测重点实验室
Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration

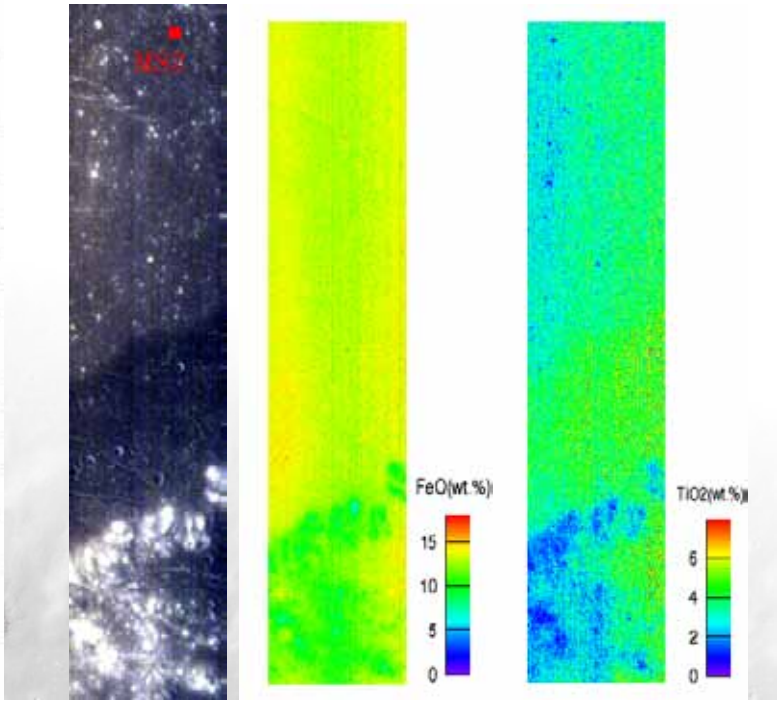

170°W 140°W 110°W 80°W 50°W 20°W 0° 20°E 50°E 80°E 110°E 140°E 170°E
90°N 70°N 50°N 30°N 10°N 10°S 30°S 50°S 70°S 90°S

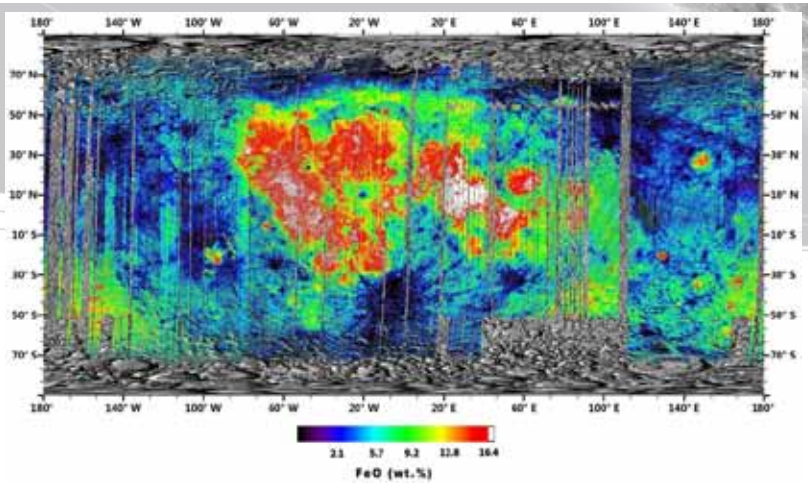

170° W 140° W 110° W 80° W 50° W 20° W 0° 20° E 50° E 80° E 110° E 140° E 170° E
90° 80° N 70° N 60° N 50° N 40° N 30° N 20° N 10° N 0° 10° S 20° S 30° S 40° S 50° S 60° S 70° S 80° S 90°

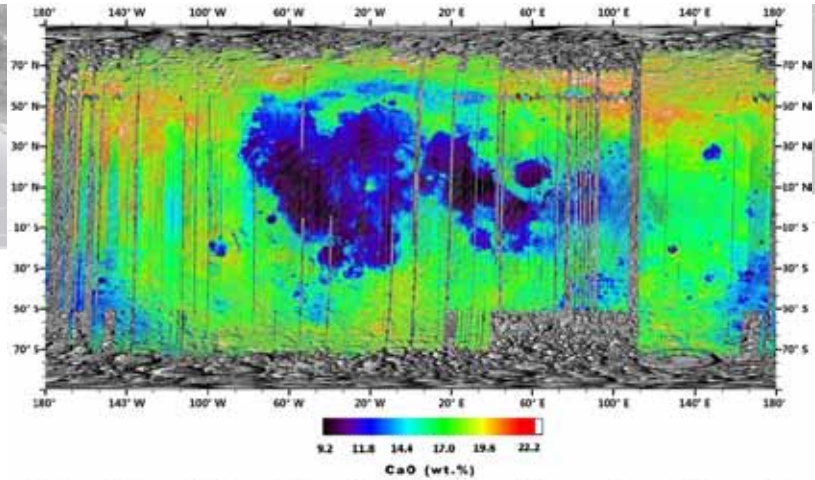
2. 月表物质多光谱数据

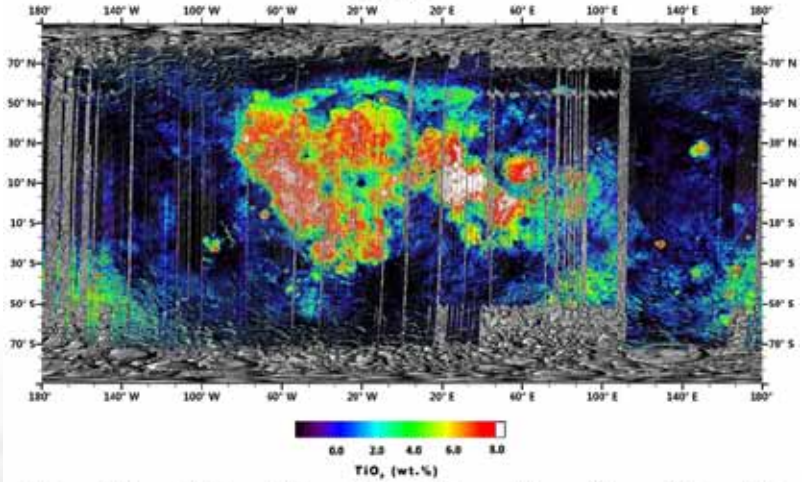
- 覆盖率：共获得了706轨有效探测数据，覆盖了月球南北纬70°以内84%的月表区域（相当于全月球的79%）。
- 空间分辨率：200m；
- 光谱：480~960nm，共有32个谱段，光谱分辨率为7.6~29nm。嫦娥一号成像光谱数据的谱段，远比Clementine UVVIS光谱仪（5个谱段）多，且光谱分辨率高。
- 进一步的工作将利用光谱数据解译月表矿物和元素的含量分布。

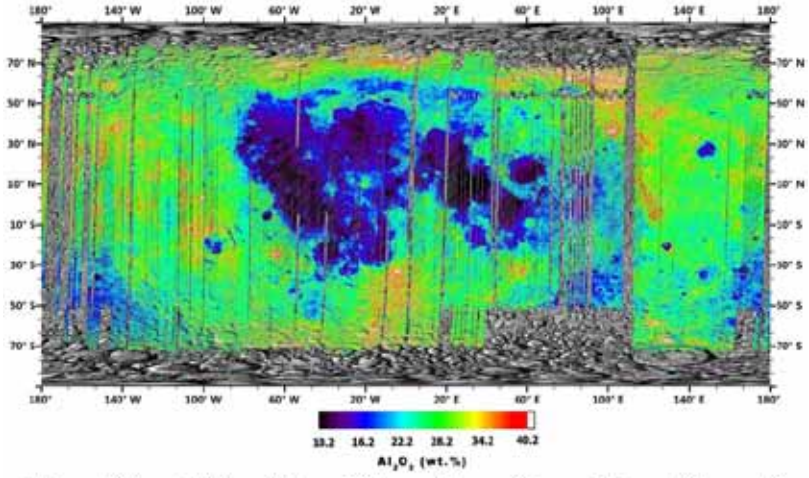


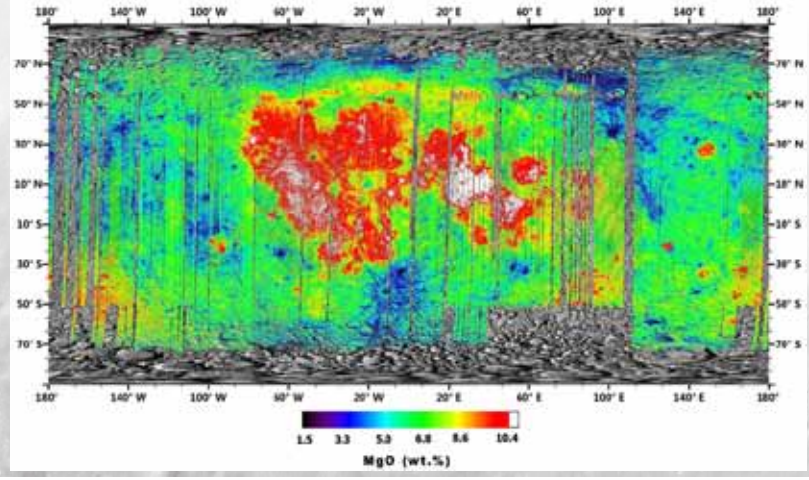


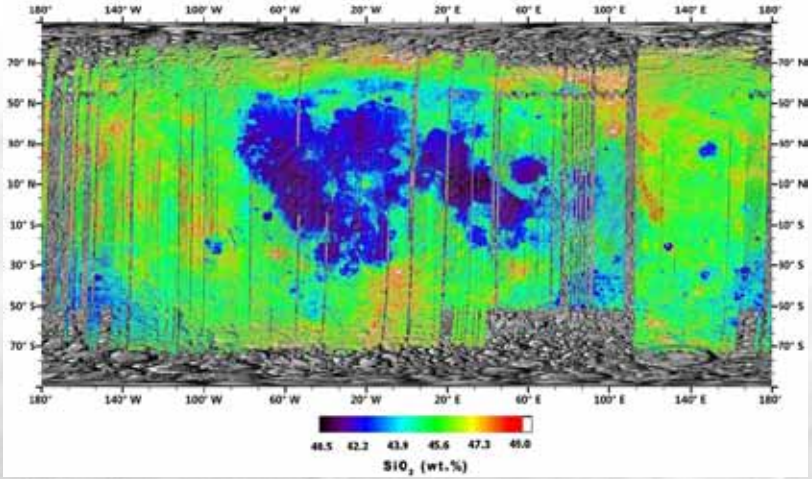

2.1 5.7 9.2 12.8 16.4
FeO (wt.%)


9.2 11.8 14.4 17.0 19.6 22.2
CaO (wt.%)


0.0 2.0 4.0 6.0 8.0
TiO2 (wt.%)


13.2 16.2 22.2 28.2 34.2 40.2
Al2O3 (wt.%)


1.5 3.3 5.3 6.8 8.6 10.4
MgO (wt.%)


40.5 42.2 43.9 45.6 47.3 49.0
SiO2 (wt.%)

数据发布与数据应用

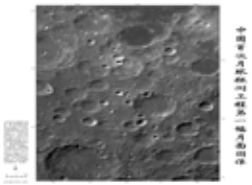
（一）、数据发布

- 自2007年11月底接收到嫦娥一号数据后，地面应用系统即向各载荷研制单位提供了原始探测数据和工程数据，用于在轨测试、仪器性能分析和数据处理方法改进。
- 根据数据发布政策规定，2008年8月开始嫦娥一号数据的正式发布。截止到2012年10月，向中国大陆的51个大学、研究机构和港澳台4个大学研究机构，以及12个国外研究机构无偿提供了嫦娥一号的探测数据，数据量达8.2TB。
- 向中国大陆的32个大学、研究机构和港澳台2个大学研究机构无偿提供了嫦娥二号的探测数据，数据量达36.2TB。

嫦娥一号和嫦娥二号发布的重要成果

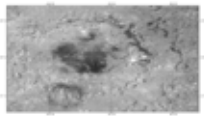
嫦娥一号

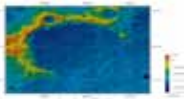
2007年11月



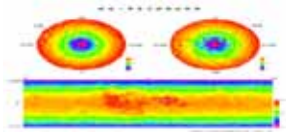
嫦娥一号第一幅月面影像图

2009年5月





典型区地形地貌制图



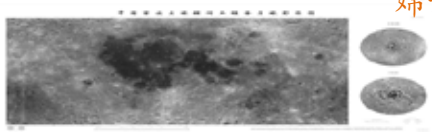
微波探测数据

2009年11月

月球仪

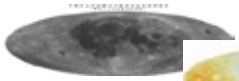
全月影像图和地形图分幅图集

2008年8月

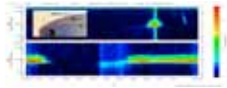


嫦娥一号全月面影像图

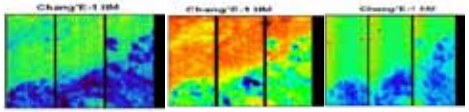
2009年9月



全月正射影像和地形图



太阳风的离子能谱



多光谱数据

2010年1月

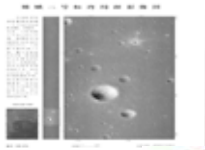
月球空间信息发布系统

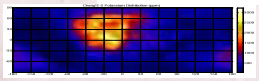
X射线能谱观测数据

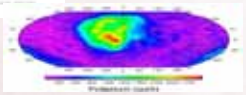
嫦娥二号

嫦娥二号虹湾月球影像图

2010年11月

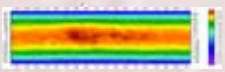






伽马射线谱仪数据

2011年12月

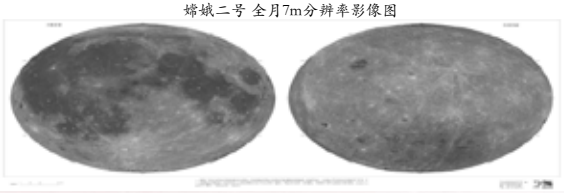


月壤特性探测亮温分布图

撞击坑分布图

嫦娥二号 全月7m分辨率影像图

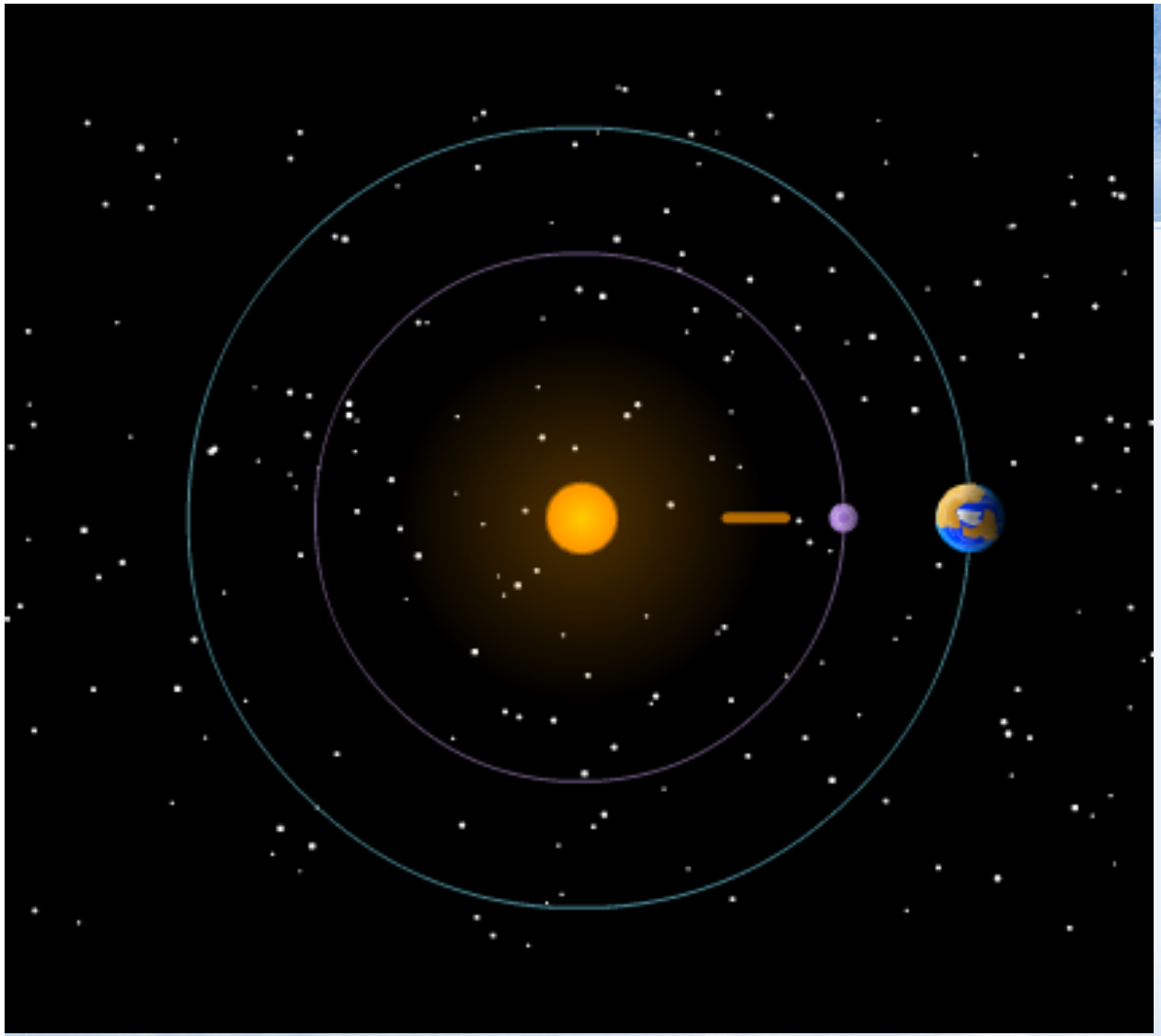
2011年11月



2012年1月

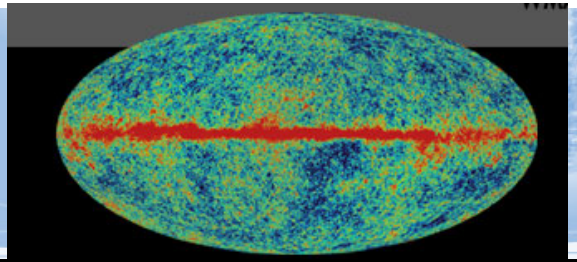
嫦娥二号高分辨率影像图集

成果形式	探测器	内 容	参 数	数据量(MB)	
数据(3.5T)	CE-1	全月球影像图数据	分辨率120m	4,000	
		全月球三维地形数据	分辨率500m	500	
		月球标准基础地图（Base Map）数据	120m	4,000	
		元素含量分布图	U、Th、K全球；Mg, Al, Si, Fe, Ti局部	42	
		多光谱图像数据	480～960nm，32谱段，覆盖79%月面	1,500,000	
		微波辐射亮温数据	全月球黑夜、白昼亮温分布，空间分辨率？？；数据覆盖全月球4次，	75,000	
		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。	335,000	
	CE-2	全月球影像图数据	分辨率7m，全月球	1,000,000	
		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	10,000	
		高分辨地形图数据	分辨率3m，虹湾局部	32,000	
		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，空间分辨率？？；数据覆盖全月球8次；约5000小时	75,000	
		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	430,000	

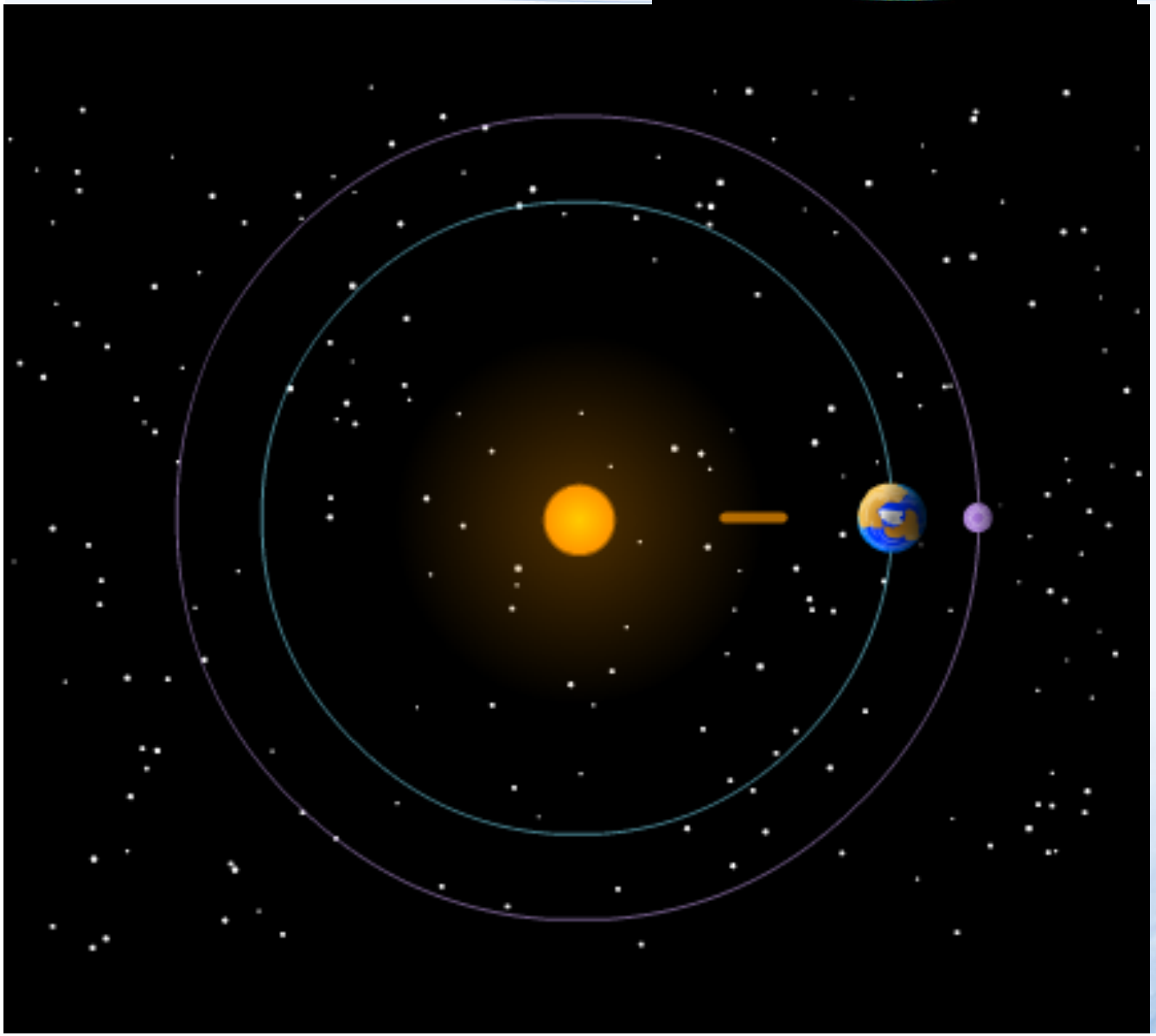


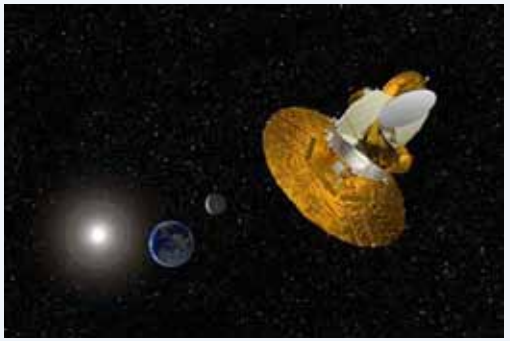
太阳及日光层探测仪（SOHO）在日-地系统的L_1点上运行。是ESA和NASA共同研制的，于1995年发射升空。

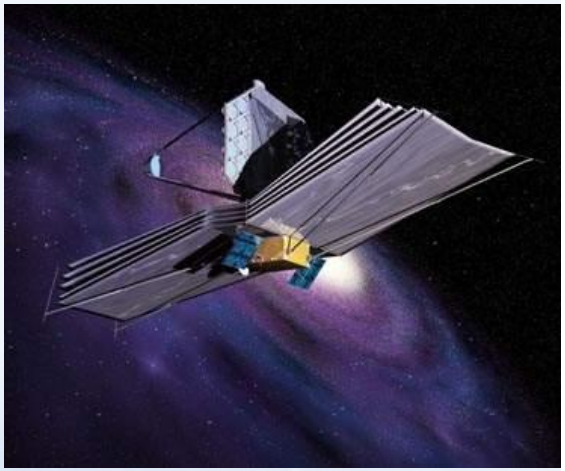
SST+SDO



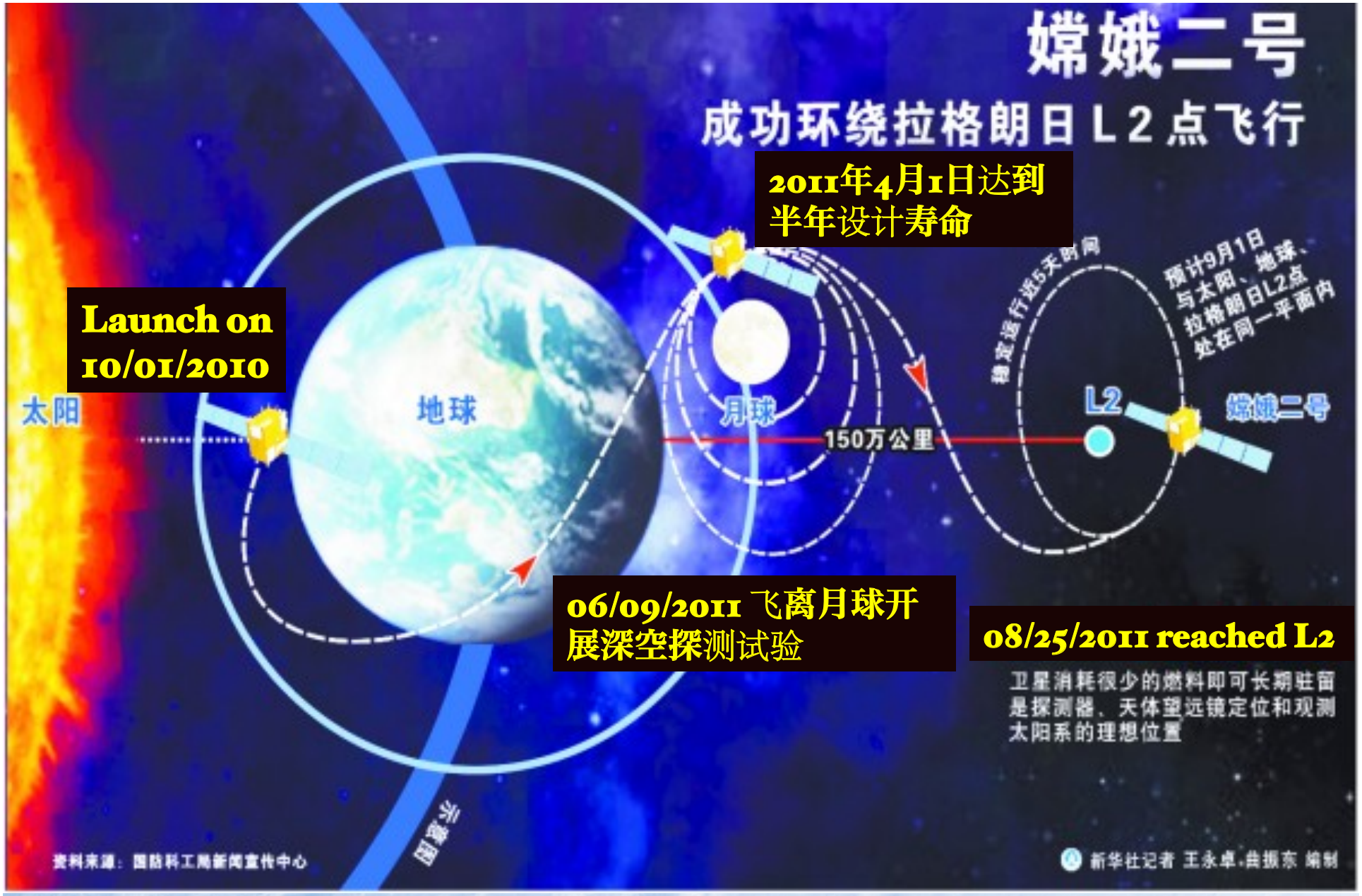
威尔金森微波各向异性探测器发射于2001年，研究宇宙微波背景辐射的变化

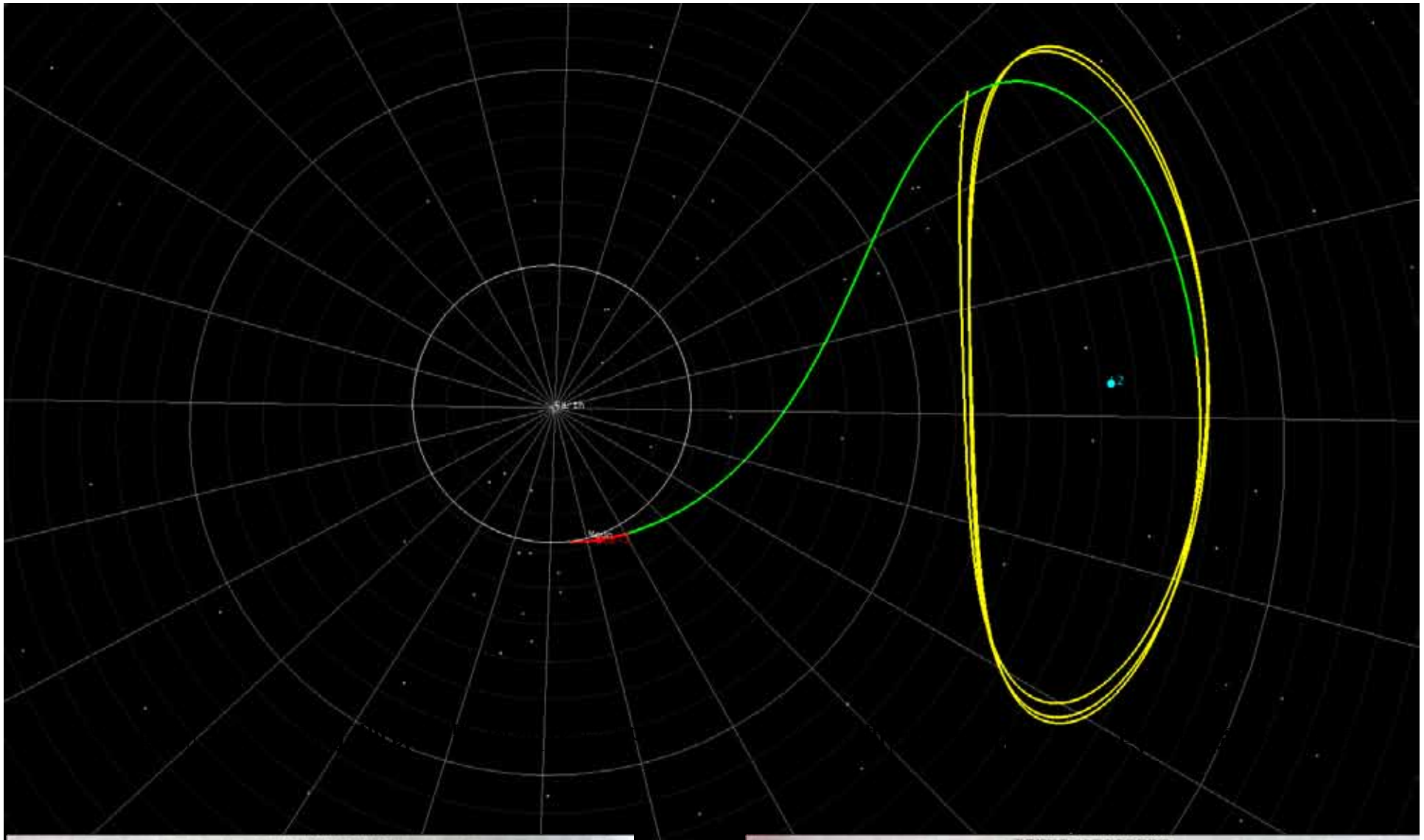


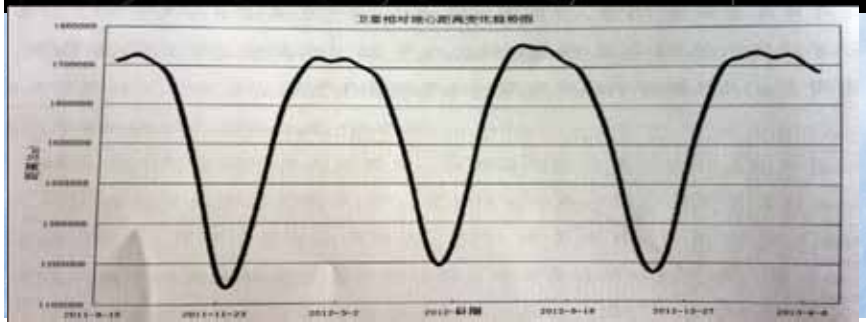


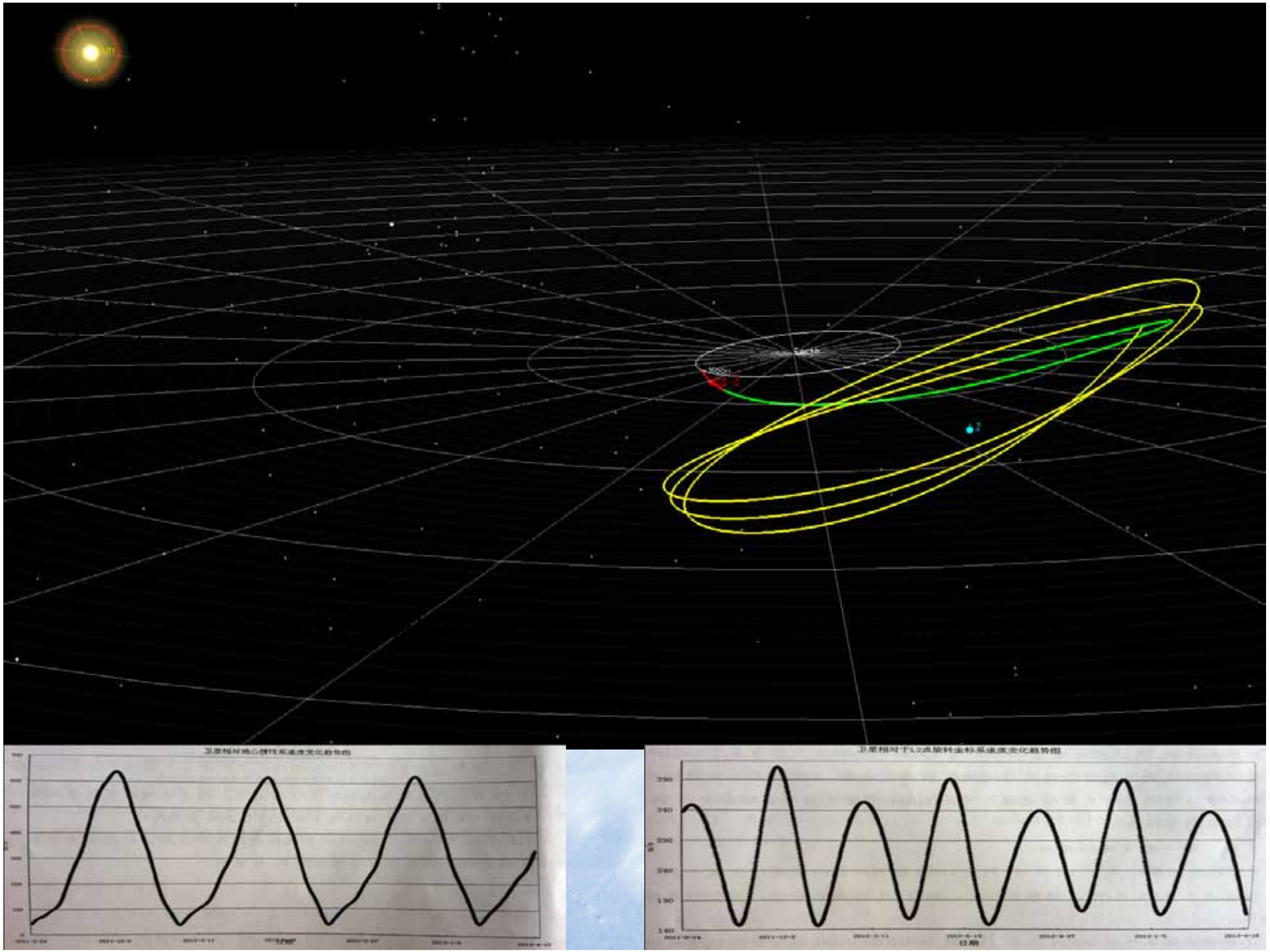


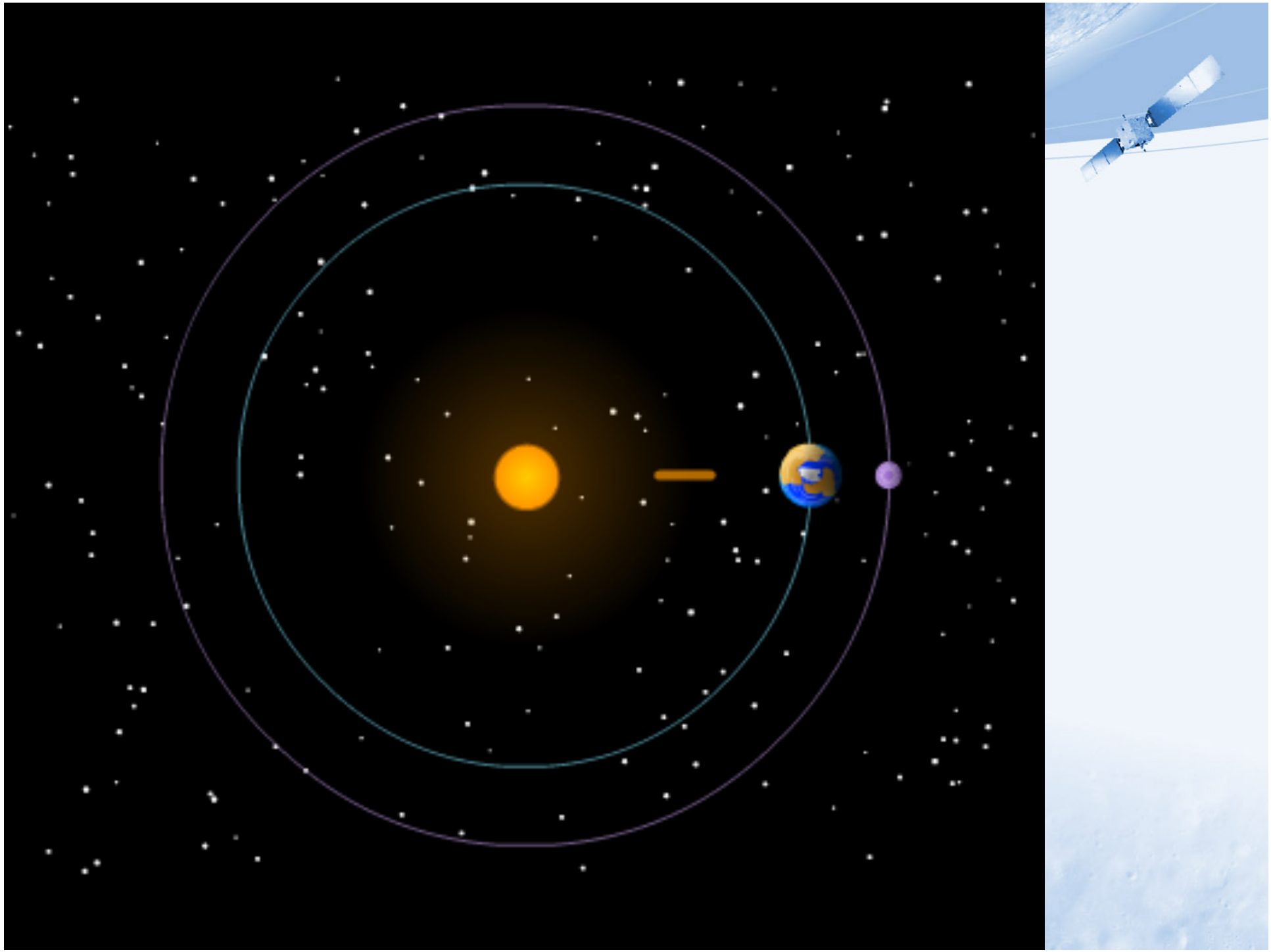
詹姆斯韦伯太空望远镜延迟到2013年发射，任务是调查作为大爆炸理论的残余红外线证据。

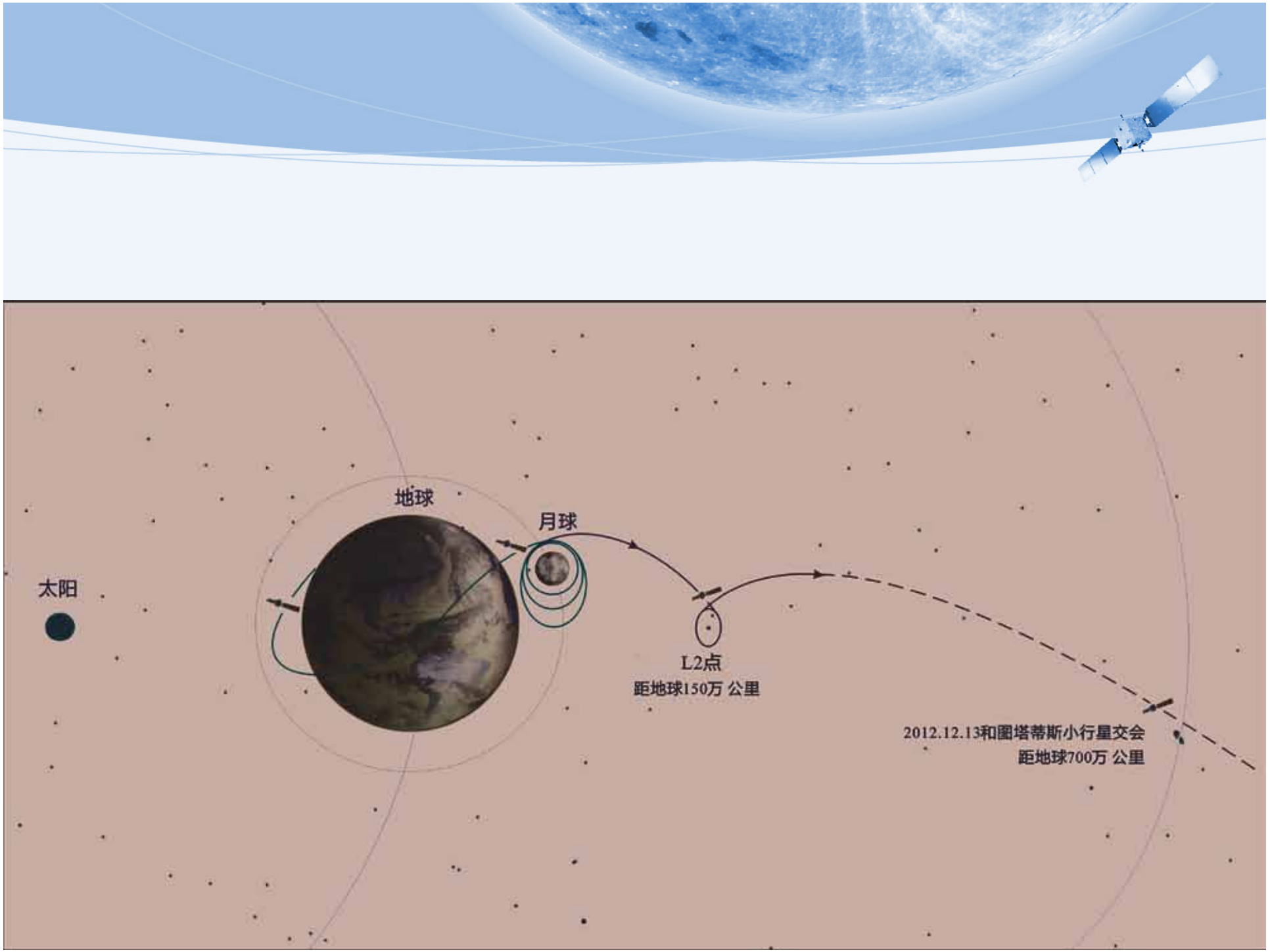

嫦娥二号
成功环绕拉格朗日L2点飞行
2011年4月1日达到
半年设计寿命
Launch on
10/01/2010
太阳
地球
月球
150万公里
L2
嫦娥二号
稳定运行近5天时间
预计9月1日
与太阳、地球、
拉格朗日L2点
处在同一平面内
06/09/2011 飞离月球开
展深空探测试验
08/25/2011 reached L2
卫星消耗很少的燃料即可长期驻留
是探测器、天体望远镜定位和观测
太阳系的理想位置
资料来源：国防科工局新闻宣传中心
新华社记者 王永卓、曲振东 编制

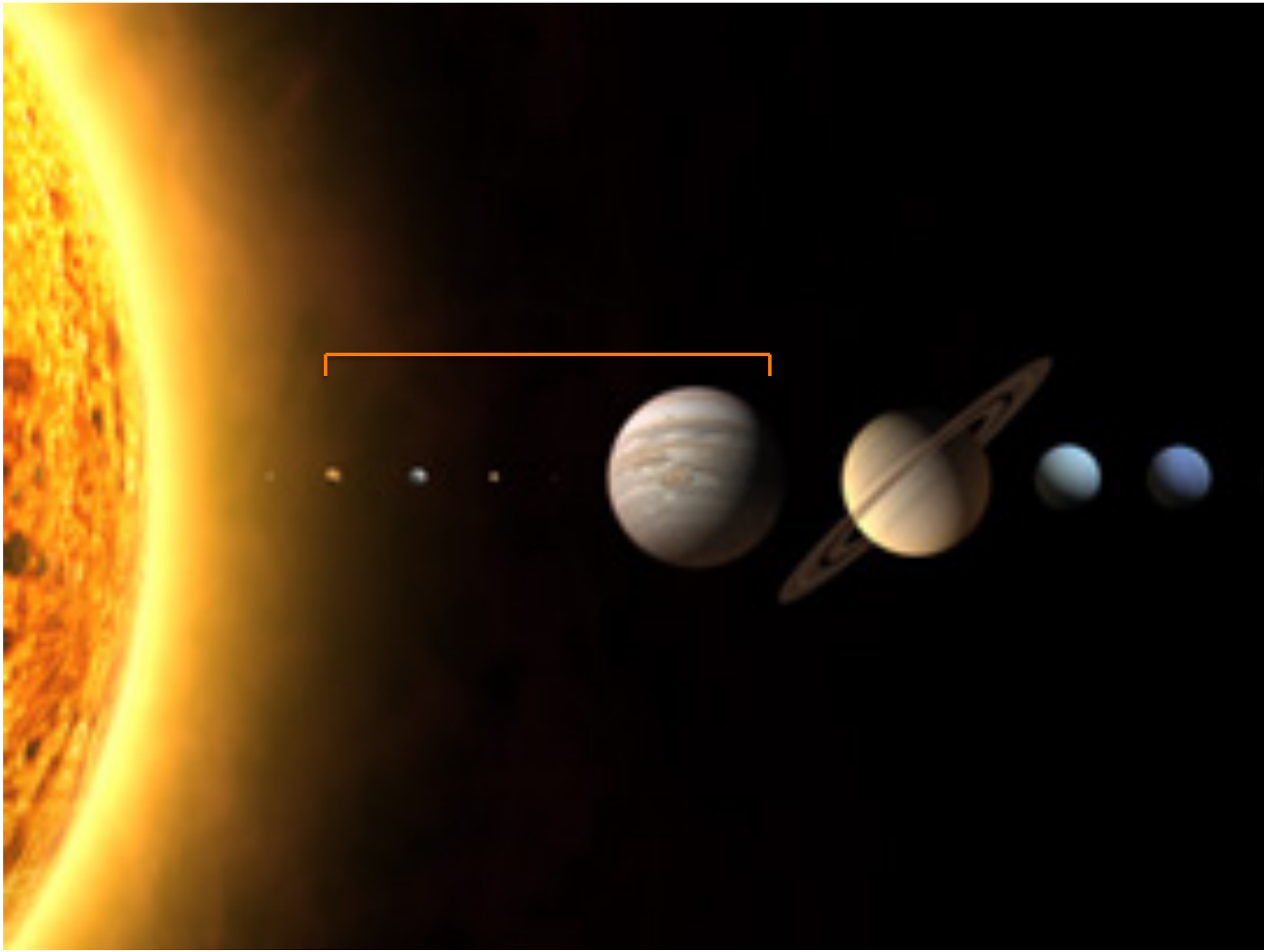

Earth
L2




Sun
Earth
Moon
L2




地球
月球
太阳
L2点
距地球150万 公里
2012.12.13和图塔蒂斯小行星交会
距地球700万 公里



Outline

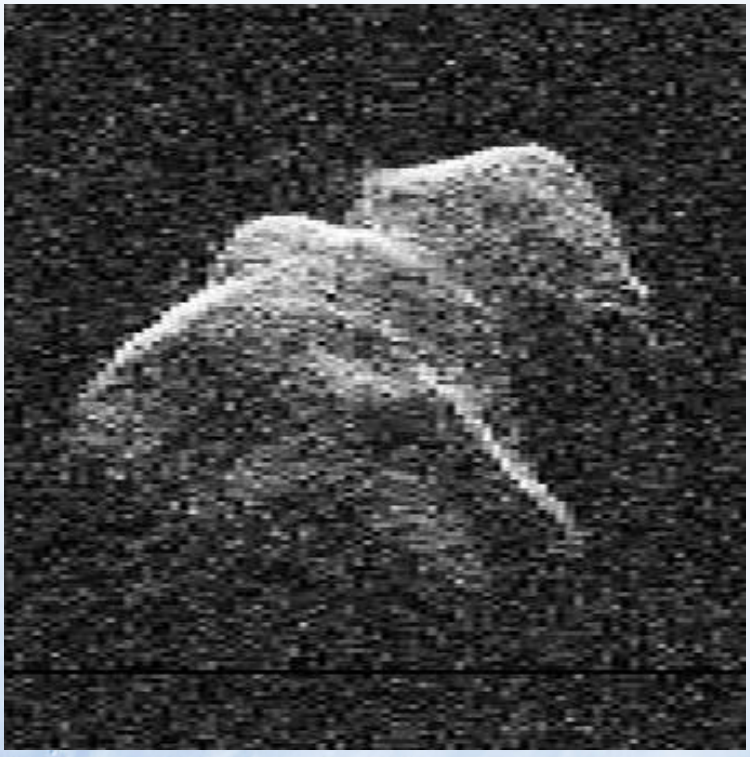
1. Introduction to the Chinese Lunar Exploration Program (CLEP)
2. Scientific exploration of Chang'e 2
3. **Chang'e 2 flyby of Toutatis**

Asteroid 4179 Toutatis (1989 AC)

- Near earth asteroid, Apollo, Alinda, Mars crosser
- S type
- Orbit
  - Semi-major axis: 2.5294 AU
  - Orbital period: 4.02 a. 3:1 orbital resonance with Jupiter, 1:4 resonance with Earth
- Rotation
  - Principal axes: (1.92, 2.29, 4.60) +/- 0.10 km (Hudson and Ostro, 1995; Hudson et al., 2003)
  - Rotational period along long axis: 5.38 days, processing period of long axis: 7.38 days
- Close approaches to Earth ~every four years
  - Closest in 2004: 897,600 km, 2.3 LD
  - Most recent flyby on Dec 12th, 2012: 6.9 million km, 18 LD

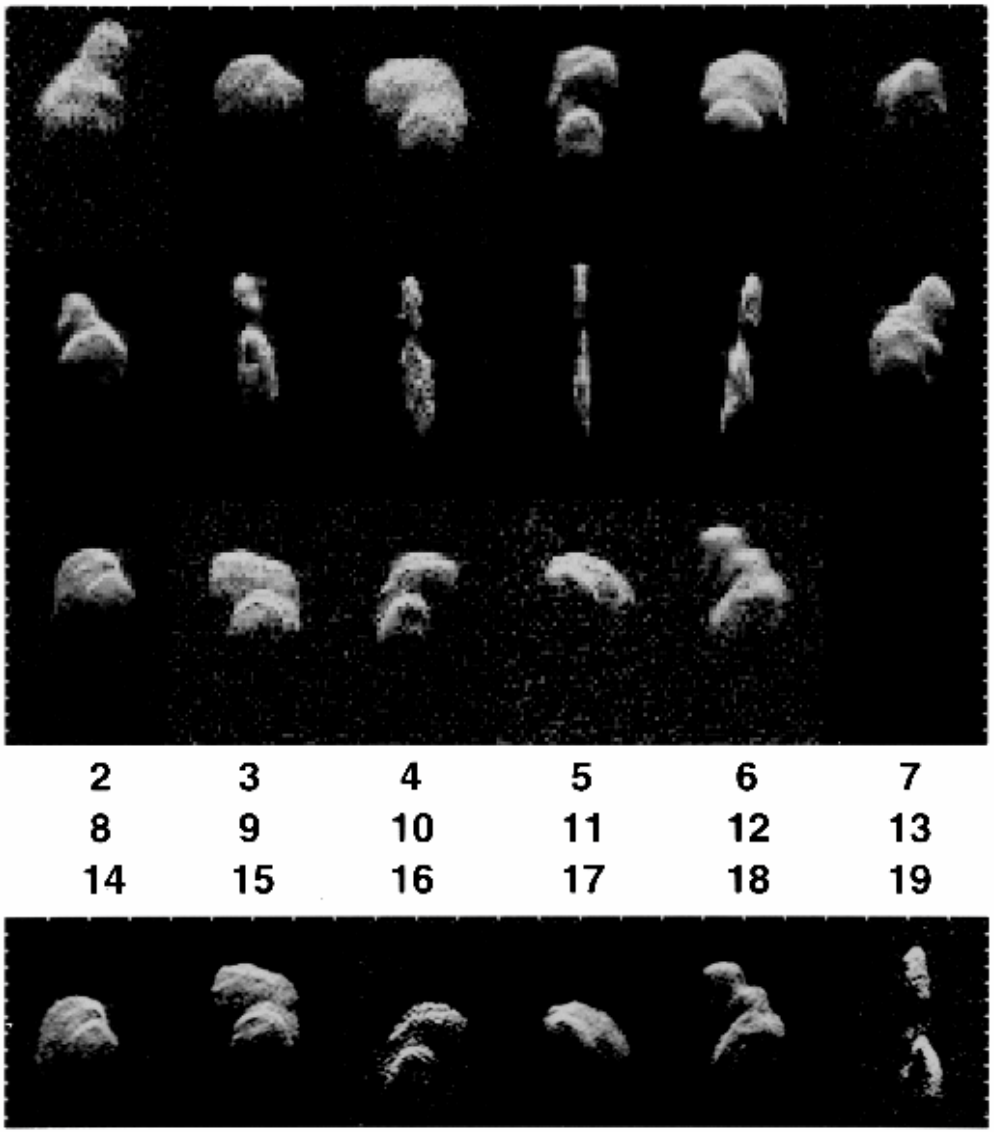
Radar Observations of Toutatis

- Acecibo & Goldstone: 1992, 1996, 2000, 2004, 2008, 2012

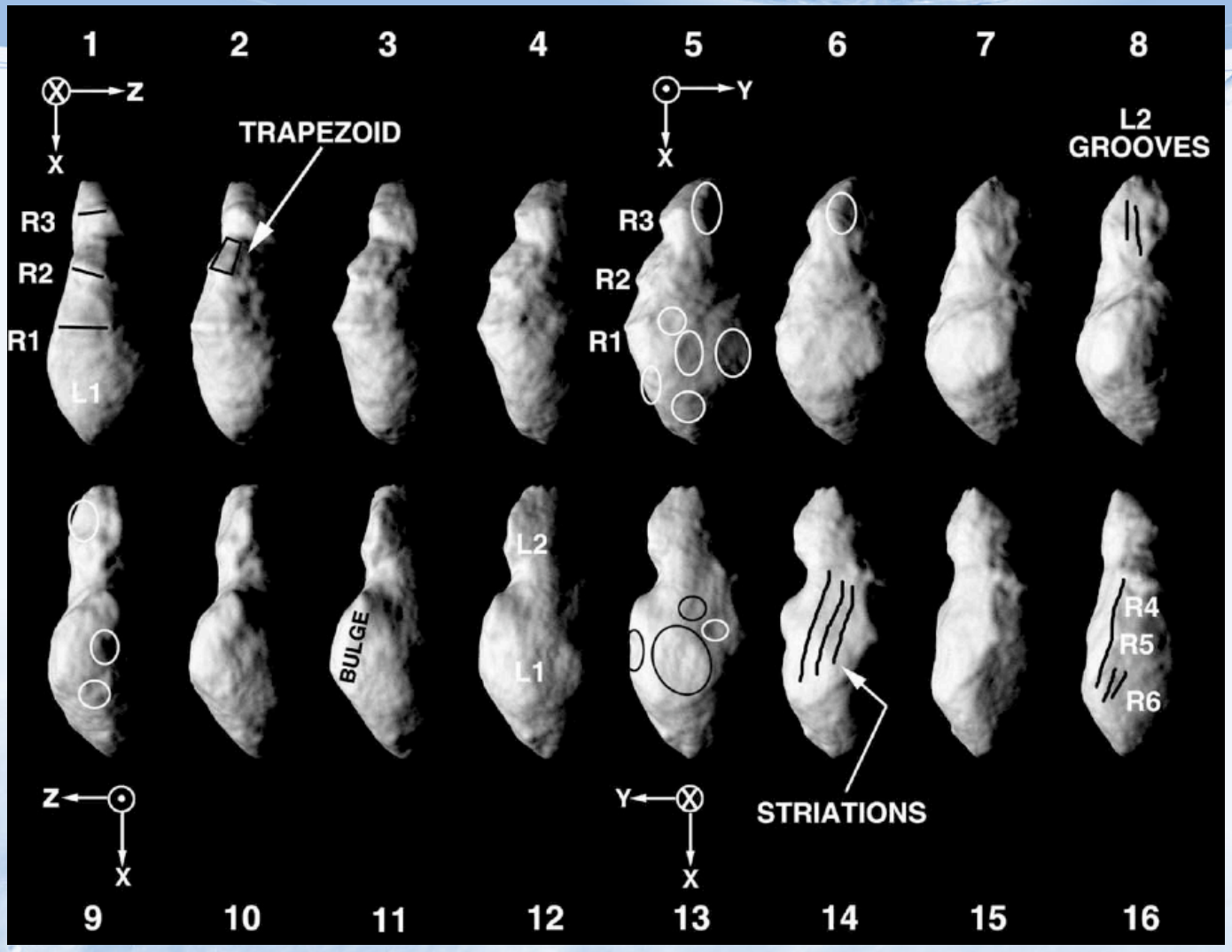


1996 Goldstone observation, delay resolution of 125 ns and typical Doppler resolution of 0.033 Hz (Hudson et al., 2003)

Radar Observations of Toutatis

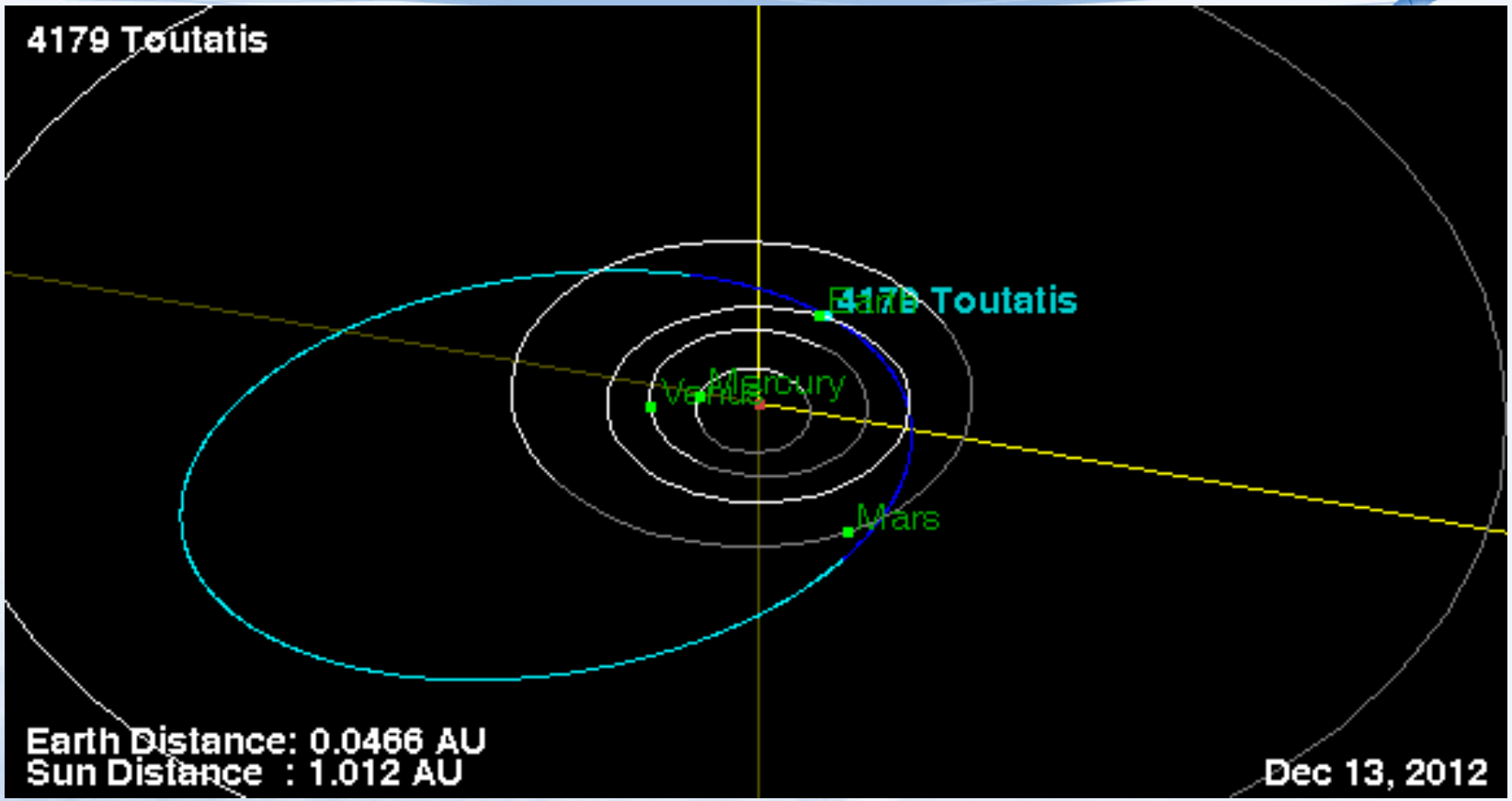


Radar Shape Model



Resolution ~10 m (Hudson et al., 2003)

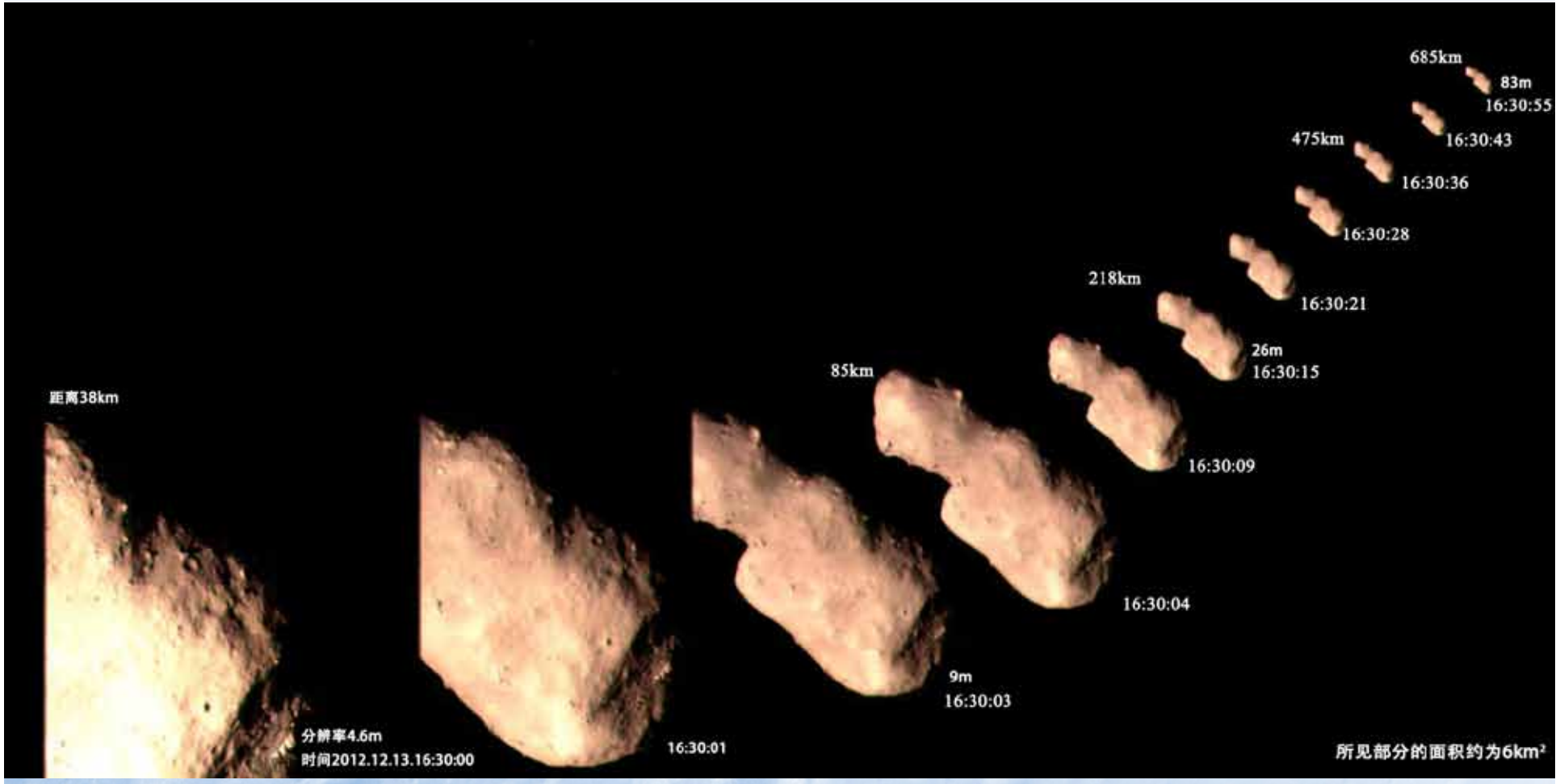
CE-2 Toutatis Flyby



- Dec 13th, 2012, Toutatis 7 million km from Earth

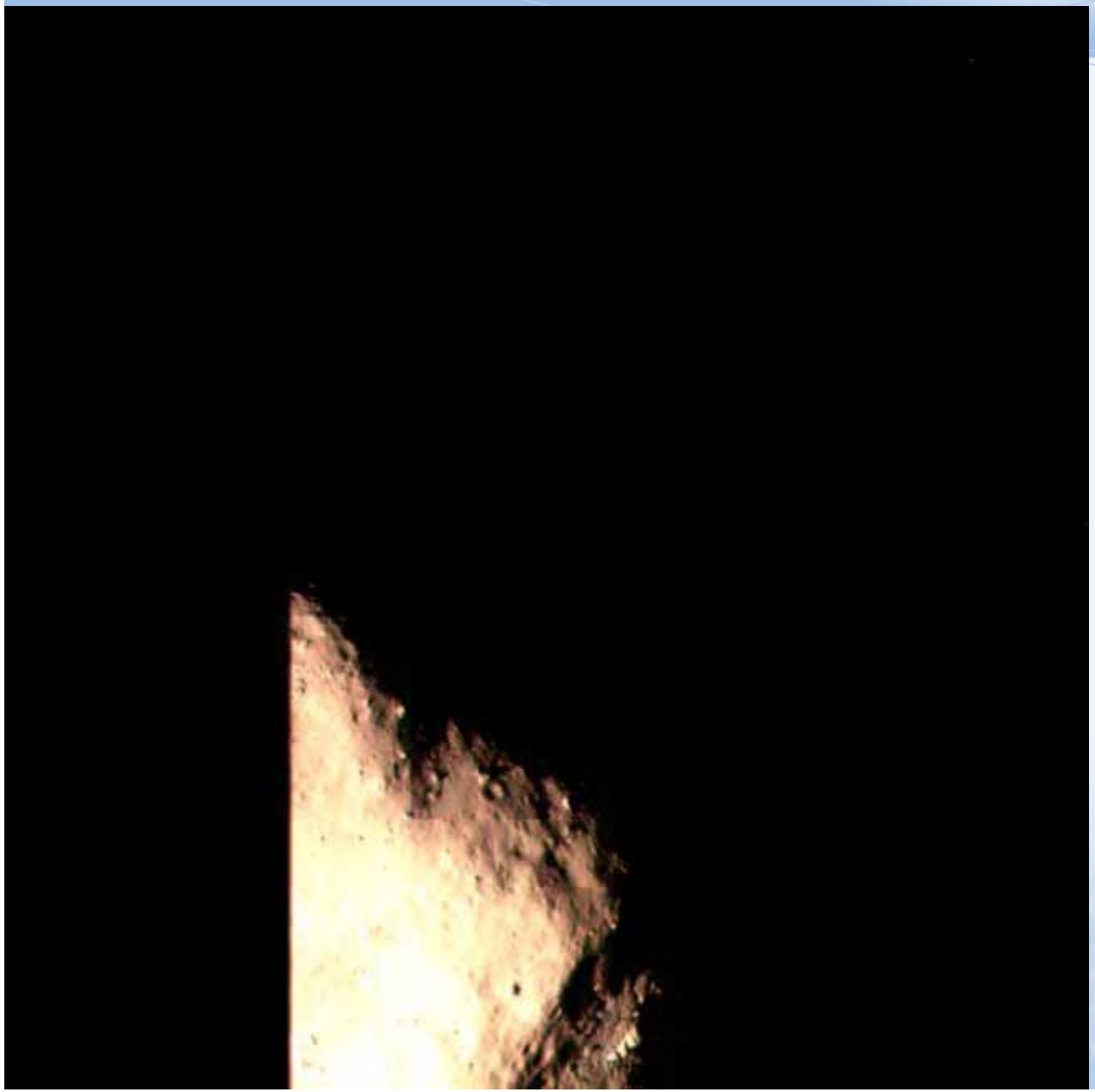
CE-2 Toutatis Flyby Images

- Solar panel monitoring camera 08:20:00-08:45:00 UTC
- Outbound image series, 08:30:04 – 08:30:55 UTC



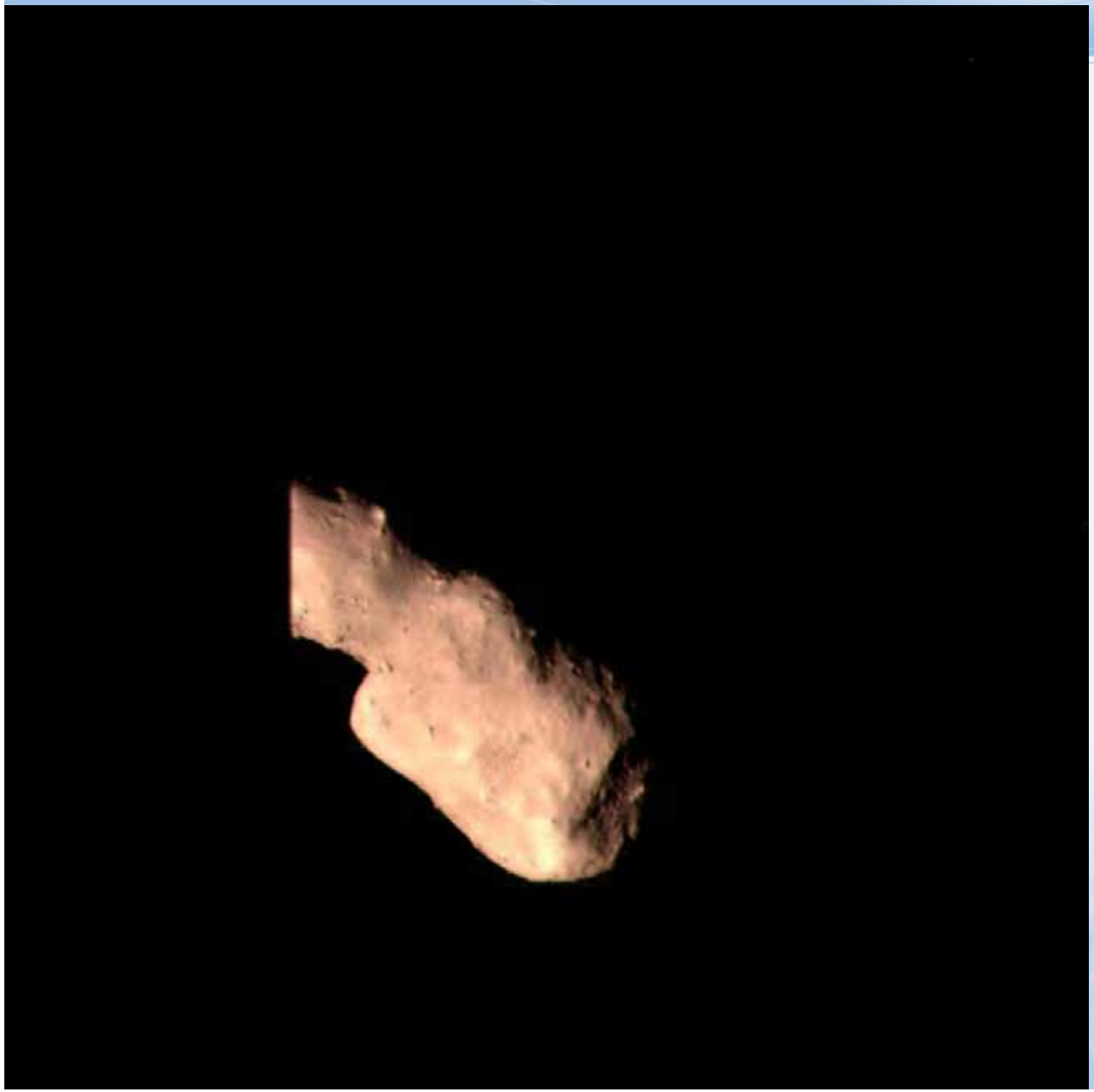
Distances here are estimated based on asteroid size. Need revision!

CE-2 Toutatis Flyby Images



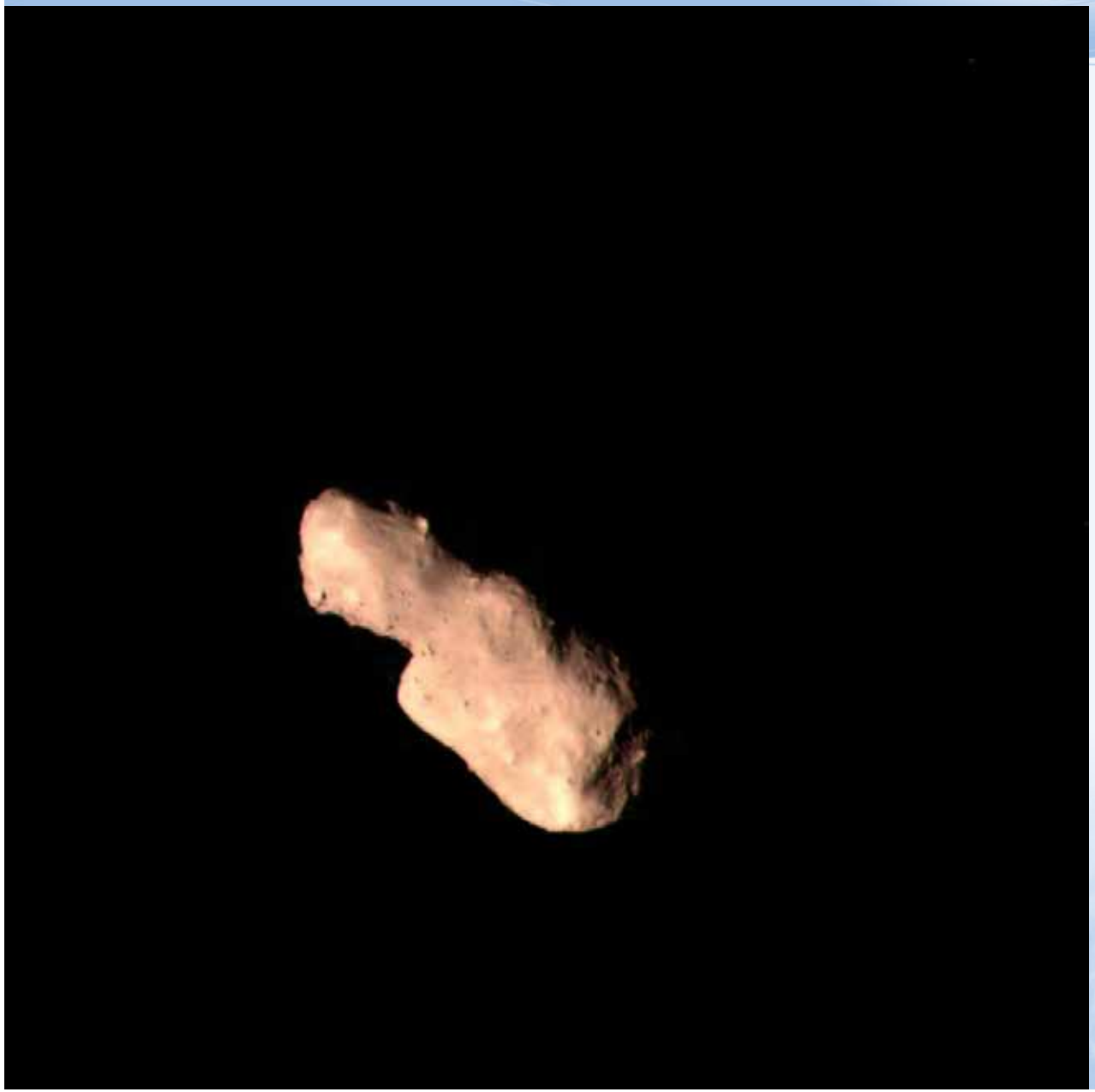
- Dec 13, 2012 08:30:00 UTC
- First clear image of Toutatis, partially blocked by solar panel
- Flyby distance: 40 Km (according to Satellite Chief Designer)

CE-2 Toutatis Flyby Images



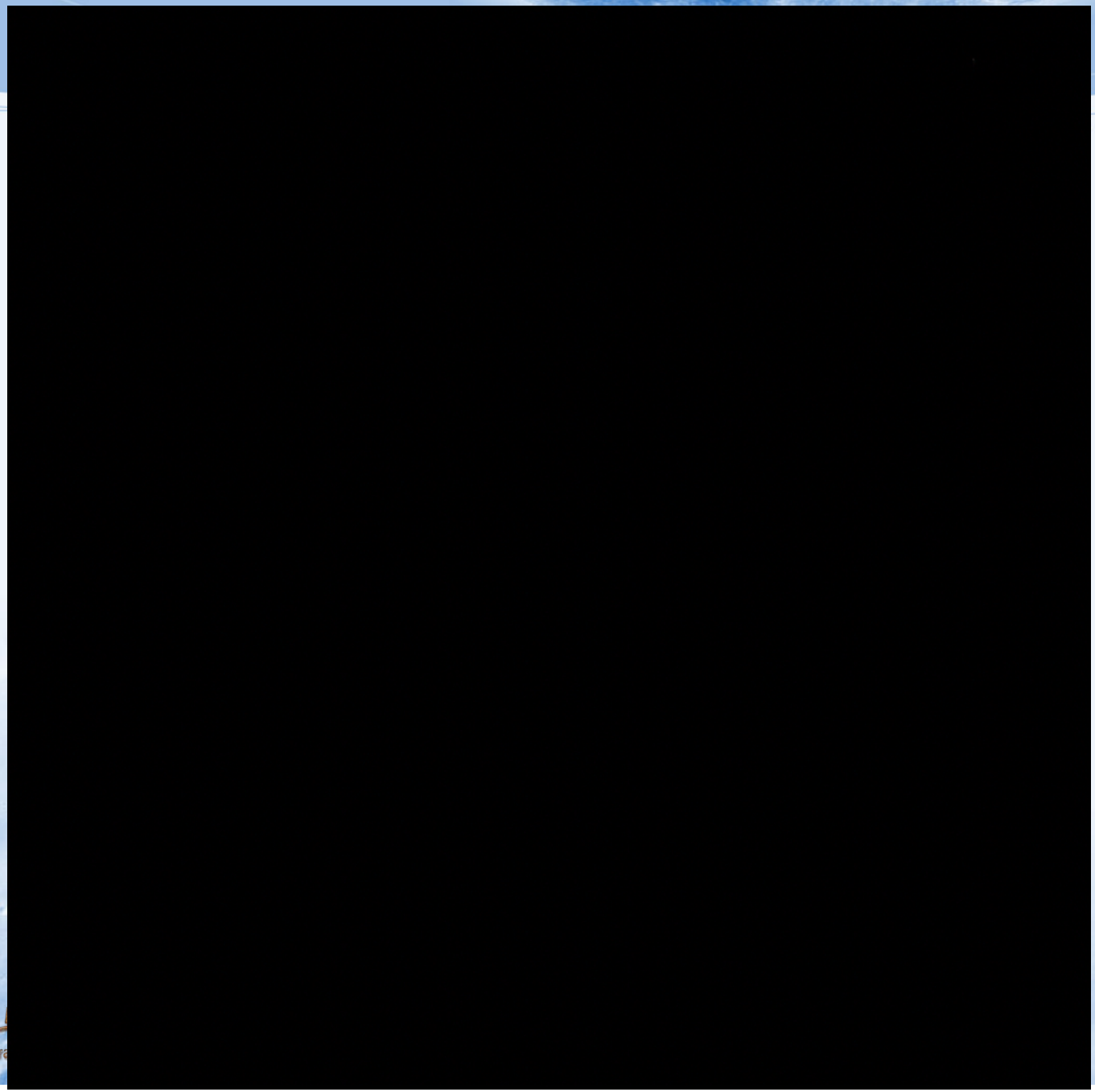
- 08:30:03 UTC

CE-2 Toutatis Flyby Images

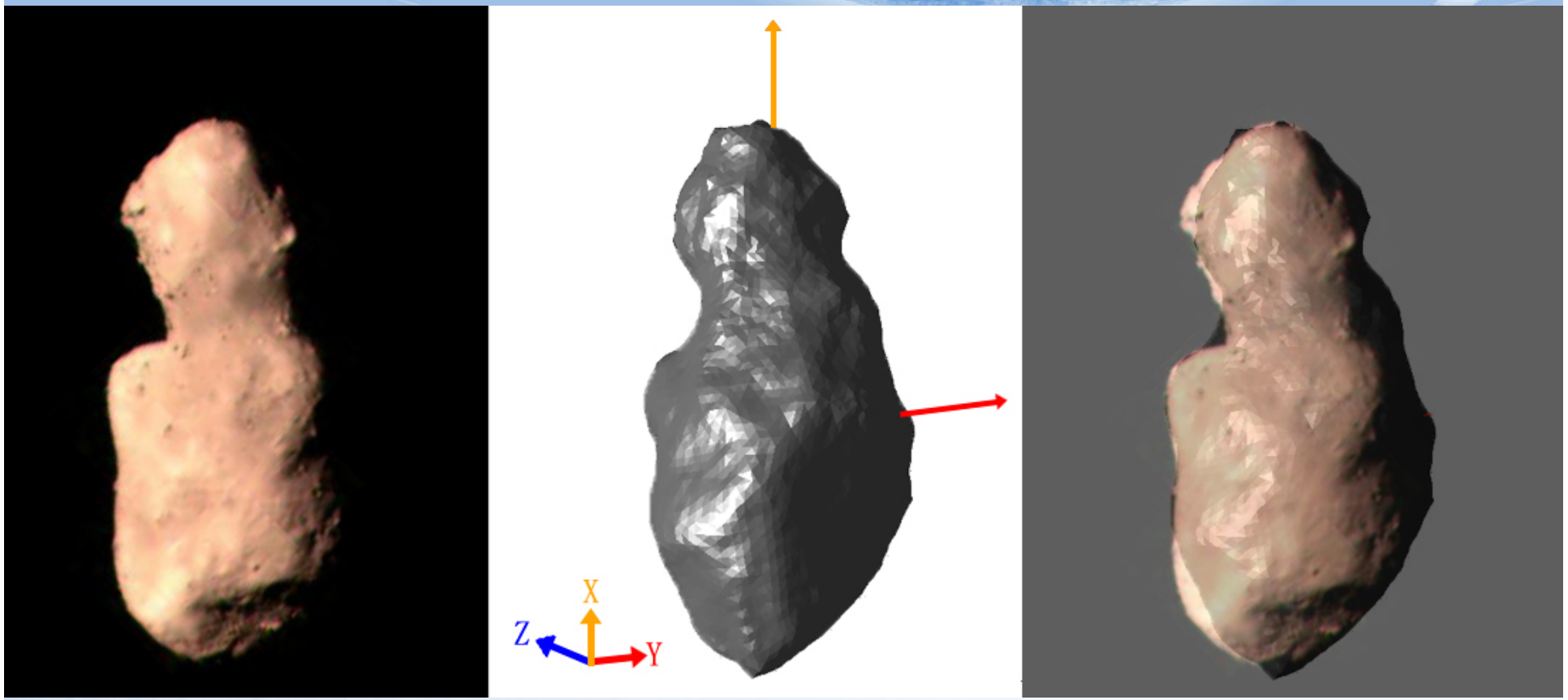


- 08:30:04 UTC
- First unblocked image
- Flyby distance 90 km (according to Satellite Chief Designer)

Toutatis flyby movie: 12/13/2012, 08:29:59-08:31:06 UTC



Comparison between CE-2 flyby image and radar-derived shape model



Jianjun Liu, Xiaoduan Zou (NAOC)

Overall size and shape match, but significant differences in detail. e.g., radar shape model with smoother concavity, tapered large lobe and small lobes

Neese, C., Ed. Small Body Radar Shape Models V2.0. EAR-A-5-DDR-RADARSHAPE-MODELS-V2.0, NASA Planetary Data System, 2004.

Further analysis:
International collaboration welcomed!

- Shape model based on combined images and radar data
- Surface morphological analysis: crater analysis, ridges, boulder etc.
- Photometry, albedo, color
- Mass and gravity model
- Rotational characteristics
- Comparative study with other near Earth asteroids: Itokawa, Eros

Thank you!

http://moon.bao.ac.cn