

多层月球模型的自转动力学与着陆探测

Alexander GUSEV^{1,2}, 孟治国^{1,3}, 平劲松¹, Natalia PETROVA², Hideo HANADA⁴

(1. 中国科学院国家天文台 月球与深空探测重点实验室, 北京 100012; 2. 俄罗斯喀山联邦大学 天文系, 喀山 420008; 3. 吉林大学 地质探索科学技术学院, 长春 130012; 4. 日本国立天文台, 水泽 181-8588)

摘要: 着重于寻找月核证据并将月核模型引入月球天平动理论中, 探讨如何将多种空间探测技术应用于毫角秒精度的月球天平动观测, 进而测定液态和固态月核参量。通过讨论多层月球的月球物理参数、流体核的几何与动力学椭圆率、松散黏滞的月幔, 可获得月球相关详细信息与参量, 这些参量对评估多层结构的月球自由天平动很重要。物理天平动的解析理论还可应用于未来多种月球工作中, 期望在近代月球科学研究基础上能有进一步发展。

关键词: 月球; 内部结构; 动力学; 物理天平动; 月球任务

中图分类号: P691 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2014)03-0175-06

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2014.03.002

Spin-Orbit Dynamics of the Multi-Layer Moon for Landing Missions

Alexander GUSEV^{1,2}, MENG Zhiguo^{1,3}, PING Jinsong¹, Natalia PETROVA², Hideo HANADA⁴

(1. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, National Astronomical Observatories China, China Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia; 3. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China; 4. National Astronomical Observatory of Japan, Mizusawa 181-8588, Japan)

Abstract: The emphasis will be put on the evidences of lunar core existence and on the necessity to take this fact into account in the lunar librations theory. Our goal is to show how the millisecond precision observations of lunar physical librations in the projects. We discuss geophysical parameters, geometrical and dynamic ellipticity of liquid core and viscose-elastic mantel of the multilayered Moon. The research results include the survey of internal structure of the Moon, tabulated values of geophysical parameters and geophysical profile of the Moon, including liquid lunar core, values of geometrical compression on the Moon's surface, densities, as well as graphic representations of the received data. The new prospects for horizons of research and development of the Moon for the nearest decade will be opened.

Key words: Moon; interior; dynamics; physical libration; lunar missions

0 引言

月球物理天平动的观测及理论解析可以提供大量的关于月球内部构造的信息, 近年来有多篇讨论相关问题和结果的文章^[1-5]发表。在刚体月球物理

模型与观测结果一致度降低的情况下, 研究月球自转有助于我们深入了解其复杂的内部构造。

美国宇航局 1998 年实施的 Lunar Prospector 计划, 主要通过监测月球轨道变化获得其重力场感应情况, 进而测量其潮汐影响随时间变化的情况。

收稿日期: 2014-07-25 修回日期: 2014-08-19

基金项目: 中科院外籍专家项目(2013T2J0016); 中科院俄乌白国际合作项目(2013-2014); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB857101); 俄日科技合作项目 RFBR(N-14-02-91212)

重力场变化与高精度的月球电磁场和潮汐表面耗散有关,测量其变化可获得关于月球流体核的大小和组成成分等基本信息^[1-2]。月震学也可提供清晰的月球内部构造图像,一般是通过月面活动实验室或月面天文地质物理望远镜测量获得相关数据(见表 1)。故月面着陆器,是提供月震等数据的最佳工具。月面着陆器可将激光反射镜带上月面,为月球激光测距(LLR)提供反射点,为精确监测月球轨道提供可能。同时,月面着陆器还可从地面携带月面望远镜,为研究月球天文地质状态提供可能。

表 1 月球物理参量
Table 1 Geophysical lunar parameters

参量	值
热膨胀系数/ K^{-1}	4×10^{-4}
表面重力/ $(m \cdot s^{-2})$	1.62
平均密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	3 344
幔密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	3 269
核密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	7 396
幔厚度/m	1.288×10^6
月幔比热/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	1 300
月核比热/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	675
幔热传导率/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	4
黏度系数/ $(Pa \cdot s)$	1.5×10^6
潜激活温度/K	5.6×10^4
幔潜伏热熔融/ $(J \cdot kg^{-1})$	4.2×10^5
表面热流/ $(m \cdot W \cdot m^{-2})$	13.1/16.9
上幔温度梯度/ $(K \cdot km^{-1})$	2
下幔(855 km)温度/K	1 700
早期热对流瑞利数	$(2.4 \sim 3.6) \times 10^5$
铀浓度/ $p \cdot p \cdot b$	25.7
原初核温度/K	1 800
当前核温度/K	1 400~1 700
核密度/ $(gr \cdot cm^{-3})$	7.8~7.9
核压强/kbar	45~50

在 LLR、GRAIL、ChangE、Luna-Glob、Luna-Resource、SELENE-2 等任务积累的数据基础上,我们有机会实现月球导航历表这个设想。对于月面光学及无线电定位观测、激光/无线电单程实验,构建月球天文、导航历表有至关重要的作用。

0.1 月核成分与构造

通过月核动力学数据研究,可进行月核成分分析,早期月球幔壳结构细化,核幔边界(CMB)演化过程研究,核幔相互作用机制重构,自由及受迫月核章动计算等研究。评估自由天平动周期,需要考虑双层及三层月球模型,其中包含钱德拉极移、自由核章动、内核极移、自由内核章动模式。

0.2 月核椭率

核幔相互作用(此相互作用是指,由对流运动及

核幔层间摩擦造成的转动惯量交换)将导致月球椭率重新分布。根据克莱劳定理,非均匀旋转体的扁率越靠近旋转中心越小,月核的椭率应该小于月幔。另外月球早期公转演化中月核冻结,在演化后期月幔才固体化,因而月核椭率可能大于月幔椭率。

1 月球内部结构:基本参量

有部分基本观点支持存在小尺寸月核及热黏性的下月幔,其中月核由金属铁与少量的硫或氧构成合金组成(见表 2 和图 1)。

表 2 月核的月球物理参量
Table 2 Geophysical parameter of lunar core

参量	值
核平均密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	7 396
外部流体核密度(Fe-FeS)/ $(kg \cdot m^{-3})$	5 300
内部刚体核密度(Fe)/ $(kg \cdot m^{-3})$	7 800
核心压强/kbar	50
核幔边界压强(1 300 km)/kbar	45~47
核幔边界温度/K	1 400
核温度/K	1 400~700
原初核温度(40~50 亿年前)/K	1 800
核热容量/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	675
核黏度/poise	1.5×10^6
早期热对流瑞利数	$(2.4 \sim 3.6) \times 10^5$
品质因子 Q	26~37
核电阻系数/ $(\Omega \cdot m)$	10^5

1.1 月球重力场结构

通过比较 Lunar Prospector(1998—1999)的高精度轨道测量、Clementine 获得的激光测高结果,以及 LLR(1970—2014)数据,可研究获得月球重力场结构模型,其中三者均假设存在金属核,故其极轴方向上的转动惯量分量,可由下式得到。

$$\frac{C}{MR_M^2} = 0.393\,1 \pm 0.000\,2 \quad (1)$$

式中:金属铁核的半径为 220~350 km,或为硫铁合金核,半径为 330~490 km^[6-7]。

1.2 极轴方向转动惯量值

该值决定于月壳、月幔的化学、热学及密度模型,并受月核的质量和尺寸大小影响。另外,由图 1 可知,在约 1 250 km 处,密度从 3.8 g/cm³ 陡然升至 7.0 g/cm³^[8-10]。

1.3 月球质心与几何中心的非一致性

月核形成于 5 亿年前,晚于月球本身的形成(41 亿年前),由此可提供证据证明月球质心与几何中心的非一致性与旋转轴的惯性轴再定位的确实存在^[11]。

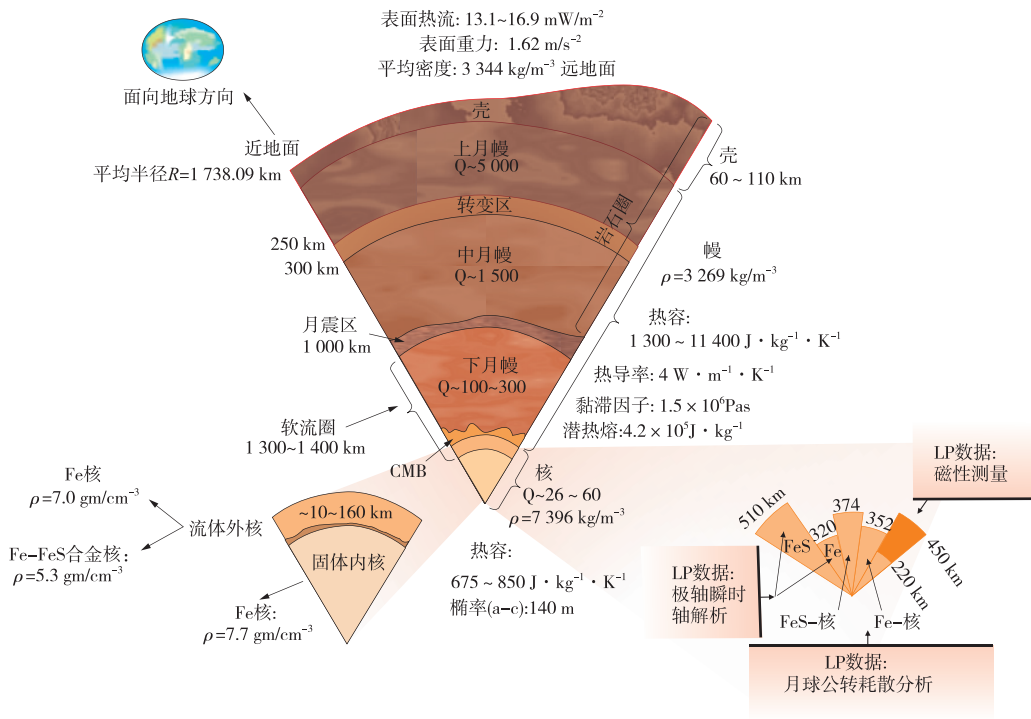


图 1 月核内部结构
Fig. 1 Interior structure of the Moon

1.4 Love 数估计

Love 数是测量行星在外部引力作用下弹性形变的无量纲量,也是表征行星由于潮汐作用而产生

形变的响应, k_2 则是其由形变产生的二阶附加势的相对整体形变影响的比例。LP 远程跟踪数据给出了详细分析结果, $k_2 = 0.02416 \pm 0.00022$,说明部

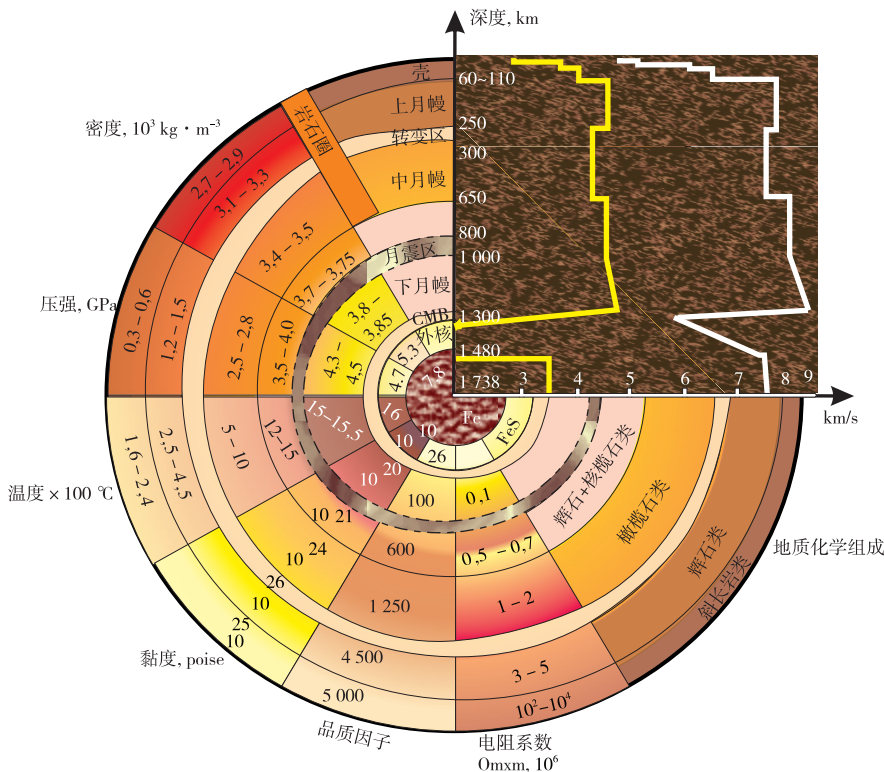


图 2 月球物理参数分布轮廓
Fig. 2 Geophysical profile of the Moon

分熔融的下月幔包围着流体核^[12],可能是由约有 200~300 km 的月震极低速区域组成^[2],而 Love 数的 k_2 值本质上限制了月核的半径尺寸及其构造。约 2×10^{-5} 精度量级的 k_2 值测量能力,为更高精度分辨流体核与固态核的边界提供可能性。

1.5 月球公转耗散的 LLR 分析

文献[4]分析指出,存在两种可能的耗散源,月周期的固态流及流体核的影响,月核与低黏度月幔的较差转动,这两种效应均已由月球公转数值积分方程计算。另外,考虑纯铁核的半径为 $R_c = 352$ km,Fe-FeS 共晶成分的核半径为 $R_c = 374$ km。有几个实验室仿照月核的极高温、高压条件,得出液态铁核的密度为 $\rho_c = 7$ g/cm³,固态铁核密度为 $\rho_c = 7.8$ g/cm³,共晶成分 Fe-FeS 组成的核密度为 $\rho_c = 5.3$ g/cm³。

2 月球的共振公转与物理天平动

月球赤道平面与其公转轨道面基本一致,转动惯量极轴方向分量绕公转极轴方向做受迫振荡,且与其他两个分量存在一个有限夹角,此夹角存在微小变化量,此即为月球纬度方向上的受迫物理天平动。

月球绕地公转规律由 1693 年提出的卡西尼三定则描述,其具体内容为:月球自转周期等于其公转周期;月球赤道与黄道相交成 1.57° ;月球自转轴、月球轨道平面的法线及黄道面的法线三者共面,且第三者处于前两者之间。

月球物理天平动是由于月球的 3 条主惯性轴长度不等,加上椭圆轨道造成的距离改变,在地球、太阳及其他大天体的引力影响下,发生对平均位置的偏移。物理天平动中的经天平动最大幅值约为 $120''$,比视天平动小 230 倍。

3 物理天平动可用表格

物理天平动根据其周期来源可分为三组,第一组主要涉及三体(日-地-月)问题,其频率是纯德劳内参数的组合;第二组主要为月球岁差作用和行星相互作用有关的参数;第三组为月球自由天平动,周期分别约为 2.89 a、80.9 a、74.6 a。表 3 中的频率及幅值大小均选自物理天平动数表^[4-5]。

4 多层月球

在历史上考虑了月幔和月核的双层模型(见图

3(a))中,钱德拉极移是月球突起绕轴转动异常的动力学结果,对于刚体月球来说,其周期约为 74.6 a,是由月球激光测月观测得来。

表 3 三层月球自由天平动的幅值和周期^[4-5]

Table 3 Amplitudes and periods of free librations of the three-layer Moon^[4-5]

参量	值
钱德拉极移(arcsec)	$8.183'' \times 3.306''$
幅值/m	69×28
周期/d	$27\,257.27 (=74.626\text{ a})$
岁差/($''$)	0.032
幅值/m	0.27
周期/d	$8\,822.88 (=24.16\text{ a})$
经天平动/($''$)	1.296
幅值/m	11 (赤道区域)
周期/d	$1\,056.12 (=2.9\text{ a})$
玮天平动	$0.002'' // 0.004''$
幅值	$0.036\text{ m} // 0.072\text{ m}$
周期/d	$29\,548.73 (=80.9\text{ a})$ $35\,113.08 (=96.13\text{ a})$ $42\,305.37 (=115.8\text{ a})$
自由核章动(流体,外部核)/ $''$	0.016
幅值/m	0.14
周期($P_{\text{FCN}}=27.312\text{ d}$)/d	$7\,481.21 (=20.49\text{ a})$
在月固参考系内/d	$67\,936.50 (=186.21\text{ a})$
在 ICRF 参考系内/d	$111\,056.91 (=304.05\text{ a})$
自由内核章动(刚体)/ $''$	0.007
幅值/m	0.06
周期($P_{\text{FICN}}=27.310\text{ d}$)/d	
在月固参考系内/a	216
在 ICRF 参考系内/a	1 020
自由内核经天平动(刚体)/ $''$	1.2
幅值/m	10.08(赤道区域)
周期/d	$693.98 (=1.9\text{ a})$
内核岁差(刚体)	
幅值	
周期/d	$3\,652.5 (=10\text{ a})$
内核极移(刚体)	
幅值	$0.004'' \times 0.001'' (0.039 \times 0.008\text{ m})$ $0.002'' \times 0.001'' (0.019 \times 0.008\text{ m})$
周期 P_{ICW} /d	$42\,305.37 (=115.83\text{ a})$ $35\,113.08 (=96.13\text{ a})$

月球自由核章动表征月幔与流体核的较差转动状况,只有核为流体或者半流体时才会存在。通过分析解的方法,李文潇等(2014)^[13]对双层模型的自由天平动,给出了一个分析解。另外,伴随着月球激光测月技术的发展,测量精度不断提高,可通过轨道数据,估计月球内部构造情况。

在双层模型基础上,考虑了存在固态内核及流体外核的月球三层模型,见图 3(b),有 4 种标准公转模式,若少了内核,模式数则减为 2,没有了流体核则减为 1。4 种标准模式分别为钱德拉极移、自

由核章动、自由内核章动、内核极移。所有模式均因内外核及慢的旋转非一致性造成。

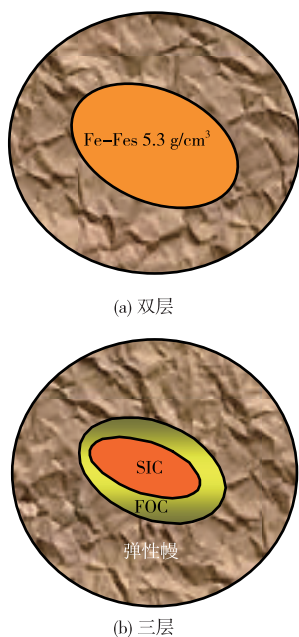


图3 多层月球模型
Fig. 3 Lunar multi-layer model

5 月球动力学领域新的着陆探测任务

多层月球模型自转问题目前依然是测月学、月球动力学和月球物理学领域中的一个有待解决的关键问题之一。伴随着各类观测技术精度提高,这个问题变得越发显著。在观测领域,测量月面反射镜到地球距离的月球激光测距技术目前可以达到亚厘米和毫米精度;而最近和计划中的 GRAIL、SELENE-2 中的 ILOM 计划,通过测量 10^{-12} 精度的月球重力场异常或者观测月球物理天平动信息来实现对月球深部构造的探测。

新的和计划中的月球着陆探测为月球自转观测带来了契机。这些探测计划包括 Chang'e-3/4、Luna-Glob、Luna-Resource、SELENE-2 等。其中 Chang'e-3/4 着陆器在月球正面着陆,其携带的 X 波段无线电锁相转发器,为地面探测提供了往返地-月之间链路的高精度无线电测距机会^[14]。Luna-Glob 和 Luna-Resource 的着陆器将分别着陆在月球的南、北两极接近永久的光照区域,并且都携带了超稳定晶体振荡器和 X 波段 DOR 信号发射设备,为月球历表的转动的测量提供了机会^[15]。计划中的 SELENE-2 将携带角反射器和 ILOM 数字照相机顶筒,后者通过对恒星位置在 CCD 上的变化,直

接用于测量月球自转角速度变化^[16]。

6 结束语

此文着重介绍了月核存在的证据,并将其考虑入月球物理天平动理论研究中,在此基础上,评估了自由天平动周期,讨论了几种不同模式的天平动状态,并简单介绍了天平动解析结果在获得月核参量上的作用。根据月球内部分层结构,讨论了不同分层情况下的物理天平动,同时讨论了不同的月核成分及密度对物理天平动的影响。未来更多、更精确的观测数据,将促进对月球,尤其是月球内部构造的深入研究。而月面着陆器则为以上研究提供数据来源,在更高观测精度的需求基础上,月面着陆器数量、分布以及工作需求,都还需要仔细研究探讨。

致谢

作者感谢北京师范大学天文系李文潇将本文由英文翻译成中文。

参考文献

- [1] Gusev A, Kawano N, Petrova N. Investigation and exploration of the Moon [J]. Actual problems of aerocosmic systems, 2007(12):94-128.
- [2] Gusev A, Petrova N. The Moon-2012+: Spin-orbit evolution, geophysics and selenodesy of the Moon [J]. Advances in Space Research, 2008(42):289-293.
- [3] Williams J M. A scheme for lunar inner core detection [J]. Geophys. Research Letters, 2007 (34): L03202. doi: 10.1029/2006GL028185.
- [4] Williams J M, Boggs D H, Folkner W M. DE430 Lunar orbit, physical librations, and surface coordinates [P]. JPL IOM335-JW,DB, WF-2013, 0722-016, 2013.
- [5] Williams J G, Konopliv A S, Boggs D H, et al. Lunar interior properties from the GRAIL mission [J]. J. Geophys. Res. 2013, doi: 10.1002/2013JE004559.
- [6] Konopliv A S, Binder A B, Hood L L, et al. Improved gravity field of the Moon from lunar prospector [J]. Science, 1998(281):1476-1478.
- [7] Konopliv A S, Park R S, Yuan D N, et al. High-resolution lunar gravity fields from the GRAIL [J]. Primary and Extended Missions, Geophys. Res. Lett., 2014 (41): 1452-1458.
- [8] Dickey J O, Bender P L, Faller J E, et al. Lunar laser ranging: a continuing legacy of the Apollo program [J]. Science, 1994(265):482-490.
- [9] Kuskov O L, Kronrad V A. Constitution of the Moon, 5, constraints on composition, density, temperature, and radius of a core [J]. PEPI, 1998(107):285-306.

- [10] Kuskov O L, Kronrad V A. Core sizes and internal structure of Earth's and Jupiter's satellites[J]. *Icarus*, 2001(151): 204 - 227.
- [11] Runcorn S K. The formation of the lunar core [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 1996(7):1205 - 1208.
- [12] Yoder D F, Konopliv A S, Yuan D N, et al. Fluid core size of Mars from detection of the solar tide[J]. *Science*, 2003(300):299 - 303.
- [13] 李文潇, Gusev A, 平劲松, 等. 双层结构月球的自由天平动与受迫天平动[J]. *深空探测学报*, 2014, 1(3):205 - 209. [Li W X, Gusev A, Ping J S, et al. Free and forced librations of two-layer moon[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(3):205 - 209.]
- [14] 平劲松, 王明远, 张素君, 等. 嫦娥系列探月卫星无线电科学实验简介[J]. *深空探测学报*, 2014, 1(3):192 - 199. [Ping J S, Wang M Y, Zhang S J, et al. Radio science experiments in Chang'E series missions [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(3):192 - 199.]
- [15] Kosov A S, Gotlib V M, Korogod V V, 等. 俄月球-全球等探测任务中的无线电科学试验[J]. *深空探测学报*, 2014, 1(3):181 - 186. [Kosov A S, Gotlib V M, Korogod V V, et al. Radio science experiments in russian Luna-Recourse and Luna-Glob projects[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(3):181 - 186.]
- [16] Hanada H, Tsuruta S, Asari K, 等. 用于未来月球探测的 ILOM 技术现状[J]. *深空探测学报*, 2014, 1(3):200 - 204. [Hanada H, Tsuruta S, Asari K, et al. Present status of ILOM for future lunar missions[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(3):200 - 204.]

作者简介:

Alexander GUSEV(1954—),男,教授,主要研究方向:月球物理天平动理论解析,月球内部结构分析,月球动力学研究。

通信地址:中国科学院国家天文台(100012)

电话:(010)64807839

E-mail: Alexander.Gusev@mail.ru

[责任编辑:宋宏]