

文章编号: 1007-4627(2014)01-0112-06

MCNP 模拟月表关键性元素 γ 射线与实测结果比较分析

张婧瑶^{1, 2}, 王南萍^{1, 2}

(1. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083;

2. 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室(中国地质大学, 北京), 北京 100083)

摘要: 嫦娥一号携带的 γ 射线谱仪传回大量能谱数据, 对其分析与解谱是一个比较复杂的过程。针对此问题, 提出按照月表 γ 射线来源的物理过程, 分为月球表面天然放射元素、中子非弹性散射和中子俘获三部分。用 MCNP 程序模拟其在 GRS 中的能谱数据, 将模拟结果叠加并与实测谱线对比, 结果表明, 模拟 γ 谱线能帮助辨识出实测谱线中的部分关键元素, 例如 ^{40}K 、 ^{214}Bi 等。

关键词: 月球探测; CE1-GRS; MCNP

中图分类号: P184; O582; TP274 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.01.112

1 引言

为了更好地推定月表元素的种类和丰度(如 O, Mg, Al, Si, Ca, Th, U 等), 进一步了解月球的形成及演化过程, 我国发射携带自行研制的 γ 射线谱仪(CE1-GRS)的卫星, 在环月轨道上测量月球表面的 γ 射线, 测量特征 γ 射线的能量和通量, 并以此确定月球表面物质组成及分布特征。

作为第一个登月的国家, 美国从 20 世纪 70 年代起便开始系统地对月球数据进行计算和分析, 发表了不少月球放射性模型, 收录在行星系统数据库(PDS)中; 日本也发射了携带高纯锗探测器的月亮女神号(SELENE)探月卫星; 此外, 俄罗斯也计划与印度合作, 重新开展对月球的探测^[1-3]。自发射第一台不载人月球探测卫星(CE1)起, 我国科学工作者对其传回的大量数据进行了分析处理, 得到了月表部分关键元素的特征 γ 谱线^[2,4]。

根据特征 γ 射线分布准确确定月球表面元素分布以及计算其丰度, 需要知道 γ 射线的来源、产生机制、各种本底的来源和强度以及不同能量和不同方向 γ 射线在空中 CE1-GRS 探测器上的叠加等。另外, 当用一个已知的探测器进行复杂条件和复杂环境下的精确测量之前, 需要对测量结果进行科学的预判, 即

充分利用已知的条件和物理过程对测量结果进行合理的估算。因此, 我们需要建立一个针对 CE1-GRS 探测器的物理模型, 分析处理各种信号、噪声等, 优化信号处理方法, 得到更加合理准确的结果。

本文使用 MCNP (Monte Carlo N-Particle) 程序, 参考 PDS 中给出的月表放射性元素产生的 γ 射线的能量和强度作参考, 模拟 γ 射线在 CE1-GRS 主探测器上信号的能谱和强度, 以帮助认识和分析实测能谱。

2 空间 CE1-GRS 探测器 γ 射线的来源

空间 CE1-GRS 探测器 γ 射线的来源主要分为四部分:

(1) 来自太阳宇宙射线(Solar Cosmic Rays, SCRs)。由于太阳 γ 射线呈间歇性, 且辐射量低^[5-6], 在本模型中不予考虑。

(2) 空间宇宙射线本底。主要是空间高能宇宙射线(主要是高能质子)在卫星和探测器周边物质簇射过程产生的 γ 射线^[6-8]。辐射量相对较低, 且 CE1 并未携带专门测量宇宙射线本底的探测器, 没有确切数据, 本模型中不予考虑。

(3) 月表 γ 射线产生的次级 X 射线。这是 γ 射线在

收稿日期: 2013-03-30; 修改日期: 2013-04-18

作者简介: 张婧瑶(1986-), 女, 北京人, 在读博士, 从事环境工程与地球物理研究; E-mail: neverlandyy@126.com

通信作者: 王南萍, E-mail: npwang@cugb.edu.cn.

低能区的主要本底, 对大部分特征峰谱线定性分析影响不大。

(4) 月球表层特征 γ 射线。特征 γ 射线的探测是 CE1-GRS 探测器的工作任务和数据分析的核心, 其来源复杂, 下面简单介绍。

月球表层 γ 射线主要由长寿命天然放射性元素的衰变和银河系的宇宙射线 (Galactic Cosmic Rays, GCRs) 与月球表面元素作用而产生^[9-10]。宇宙射线主要由高能质子组成。高能质子与月球表面核素发生碰撞, 产生高能的中子和次级质子, 这些粒子在月

球表层引起核反应, 产生大量 γ 射线。其中, 中子在月球表面与核子发生多次碰撞, 在此过程中损失能量, 直到被俘获吸收。快中子的非弹性碰撞和热中子俘获过程中产生大量 X 射线和 γ 射线。

根据前人的研究成果, 总结月表主要长寿命天然放射性元素衰变产生的 γ 射线的能量、通量如表 1 所示; 中子非弹性散射和宇宙射线与月表作用产生的放射性元素衰变而产生的主要 γ 射线能量、通量如表 2 所示; 月表热中子俘获产生的主要 γ 射线能量、通量如表 3 所示^[6]。

表 1 月表天然放射性元素及其重要子体衰变产生的主要 γ 射线能量和通量

元素	能量/MeV	通量/ ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)	元素	能量/MeV	通量/ ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)	元素	能量/MeV	通量/ ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)
^{40}K	1.460 8	2.352	^{232}Th	0.583 1	0.916	^{214}Bi	1.238 1	0.199
^{232}Th	2.614 6	2.193		0.510 7	0.234		1.120 3	0.481
	1.587 9	0.177		0.463 0	0.125		0.768 4	0.131
	0.968 9	0.656		0.338 4	0.285		0.609 3	1.118
	0.964 6	0.202		0.238 6	0.964		0.351 9	0.714
	0.911 1	1.054		0.727 1	0.229		0.295 2	0.343
	0.860 5	0.159	^{214}Bi	1.674 5	0.637		2.204 1	0.224
	0.794 8	0.163		1.729 6	0.123		1.377 7	0.142

表 2 中子非弹性散射和宇宙射线与月表作用产生的放射性元素衰变而产生的主要 γ 射线能量和通量

元素	能量/MeV	通量/ ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)	元素	能量/MeV	通量/ ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)	元素	能量/MeV	通量/ ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)
Mg	4.238 0	0.107	Al	2.753 9	0.209	Si	2.235 4	0.117
	2.753 9	0.106		2.210 4	0.675		1.808 7	0.306
	1.808 7	0.152		1.808 7	0.290		1.778 8	3.223
	1.368 6	0.727		1.808 7	0.238		1.778 8	0.700
O	7.117 0	0.808		1.719 5	0.167		1.368 6	0.212
	6.917 2	0.736		1.368 6	0.139		1.274 5	0.152
	6.129 4	2.592		1.014 4	0.634	Ca	3.904 4	0.232
	6.129 4	0.277		0.843 8	0.305		3.736 6	0.346
	4.438 3	1.214	Si	7.416 2	0.111		1.611 2	0.106
	3.854 0	0.372		6.877 7	0.199		0.770 5	0.101
	3.684 2	0.692		5.109 4	0.114	Ti	0.983 4	0.163
	3.086 0	0.283		4.497 2	0.105	Fe	1.810 9	0.123
	2.740 8	0.359		2.838 7	0.329		1.238 3	0.256
Al	3.004 0	0.385		2.753 9	0.309		10.846 7	1.149
	2.981 0	0.120						

表 3 月表热中子俘获产生的主要 γ 射线能量和通量

元素	能量/MeV	通量/ ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)	元素	能量/MeV	通量/ ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)	元素	能量/MeV	通量/ ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)
Mg	3.918 0	0.021	Fe	7.645 7	0.552	Ti	6.761 5	0.412
	2.828 5	0.012		7.631 3	0.602		6.419 0	0.280
Al	7.724 0	0.173		7.279 0	0.123		1.381 5	0.269
Si	4.934 0	0.336		6.019 0	0.178	Ca	6.420 0	0.241
	3.539 5	0.286		5.921 0	0.176		1.942 7	0.205

3 CE1-GRS 结构

CE1-GRS 主要由闪烁体、光电倍增管、电子学电路及与卫星相连总线等几部分组成(图 1), 探测器部件及详细描述如表 4 所示^[11-12]。考虑到卫星承载能力及技术因素, CE1-GRS 采取反符合系统代替伸杆技术来抑制本底, 结构如图 1 所示, 有主晶体和反符合晶体。

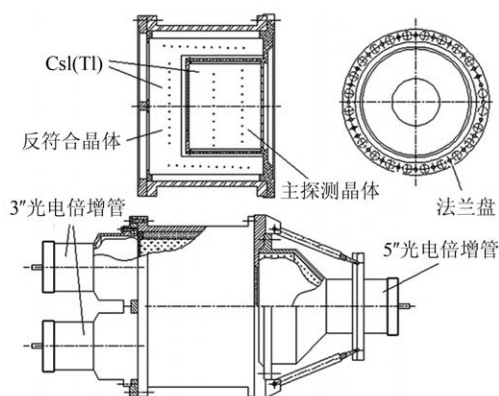


图 1 CE1-GRS 探测器结构^[12]

表 4 CE1-GRS 探测器各部件详细参数^[12]

部件名称	细节描述
主探测晶体	CsI(Tl), 11.8 cm×7.8 cm
反符合晶体	CsI(Tl), 17.8 cm×10.8 cm
测量范围	0.3~10 MeV
主探测晶体能量分辨率	8.3% FWHM@662 keV
反符合晶体能量分辨率	12% FWHM@662 keV
反符合背景屏蔽率	> 97% 5 MeV 以上
计数率	10 kHz

在后面的模拟工作中, 首先使用 MCNP 模拟月表 γ 射线在主探测器中的能谱响应, 在栅元描述中, 只选择主探测器做近似处理。

4 MCNP 模拟计算

MCNP 计算模型如图 2 所示, H 为探测器到月表距离, 模拟中主要参数^[11-12]和近似如下:

- (1) 探测器灵敏体积: 11.8 cm×7.8 cm;
- (2) 测量范围: 0.3~10.1 MeV;
- (3) 探测器能量分辨率: 8.3% FWHM@662 keV;

keV;

(4) γ 射线源: 表 1, 2, 3 所列能量和通量, 近似平面源;

(5) 忽略月表面上局部地势变化, 并假设月表元素组成均匀。

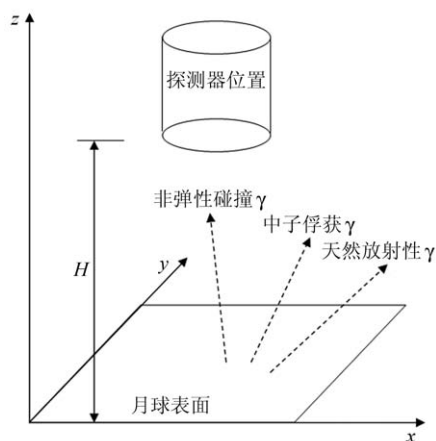


图 2 空间模拟模型

首先, 对 ^{137}Cs 能量为 662 keV 的 γ 特征射线在探测器中的响应进行模拟, 其作用主要是修订模拟的能量分辨率, 使其等于实际测量仪器的能量分辨率。能量分辨率表示仪器分辨本领的好坏, 常用 ^{137}Cs 进行刻度。结果如图 3 所示, 峰值在能量 662 keV 处, 与实际吻合很好; 但在相同峰位和能量分辨的情况下, 模拟测量结果的康普顿坪稍低, 这是由于模拟所用为理想探测器。其结果对于分析理解测量能谱影响不大。

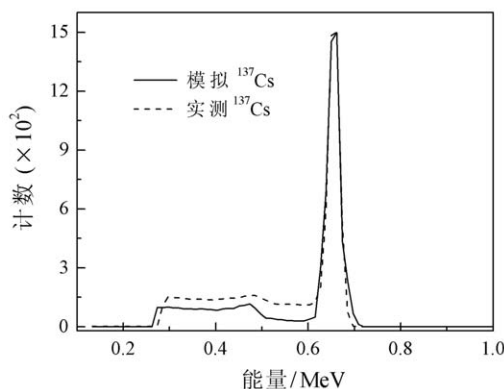


图 3 ^{137}Cs 的 662 keV 模拟谱线

图 4、图 5、图 6 分别给出了月表天然 γ 射线、月表热中子俘获 γ 射线和月表中子非弹性散射 γ 射线在探测器中的响应能谱。

图 7 给出 3 种 γ 射线在探测器上的响应总能量谱和实际测量能量谱的比较。

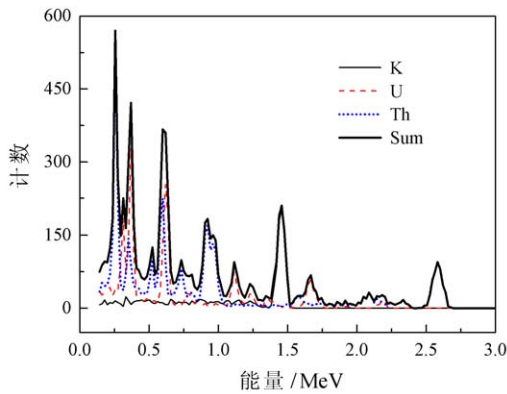


图 4 (在线彩图) 月表天然 γ 射线模拟谱线

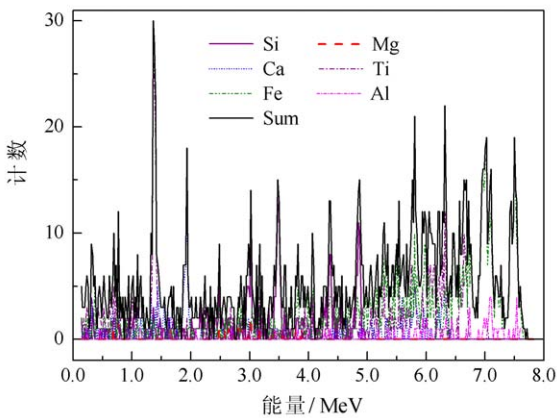


图 5 (在线彩图) 月表热中子俘获 γ 射线模拟谱线

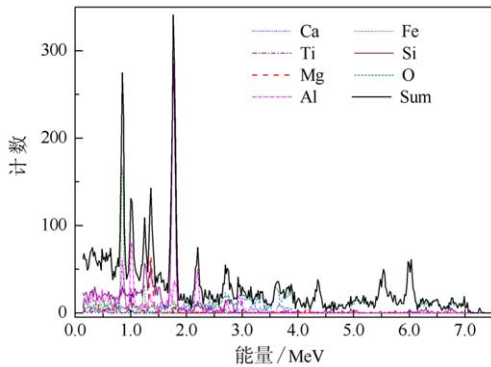


图 6 (在线彩图) 月表中子非弹性散射 γ 射线模拟谱线

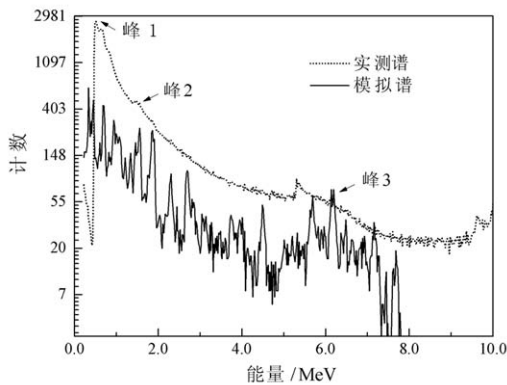


图 7 月表 γ 射线模拟谱线与实测谱线

5 模拟结果分析与结论

在初步完成月表放射性元素模拟之后, 与实测谱线相对比, 得出如下结果。

(1) 模拟谱总计数远低于实测谱, 其原因是其他背景辐射造成, 主要是宇宙线与卫星上的物质相互作用形成。宇宙中存在大量高能质子, 每一个高能质子与飞船结构物质发生级联反应, 虽然通过探测器的反符合装置可以抵消一些带电粒子造成的干扰, 但对结果还是有明显影响。

(2) 从图 6 中可以看出峰 1 是 0.511 MeV 湮灭辐射峰和 0.6 MeV 处 U 系特征元素的混合峰。月表 γ 射线可与月表物质发生多次散射从而能量降低, 因此在测量的低能区有大量散射光子被测量到, 造成低能区计数升高。

(3) 图 6 中峰 2 是 ^{40}K 能量为 1.46 MeV 的 γ 射线。

(4) 根据 PDS 中给出数据, 模拟结果中存在很强的能量为 1.778 8 MeV 的 ^{28}Si 峰, 实测谱中没有找到。

(5) 峰 3 区域是铁氧区域, 实测谱中可以看到明显凸起, 需要更多数据和详细模拟分析。

月表 γ 射线的模拟结果与实测结果对比, 能找出几个主要的重合特征峰, 但有部分模拟峰在实测数据中未看到明显峰。这是多方面的原因造成的: (1) CE1 的 CsI(Tl) 能谱仪的能量分辨率较低, 能量相近的粒子相互叠加、不同能量 γ 射线康普顿坪在低能区的重叠, 干扰了测量结果; (2) 为了确定月表主要元素的含量, 需要较长时间的持续观察^[13-14]。CE1-GRS 的主探测器于月表上空 200 km 的轨道上每隔 3 s 记录一条 γ 射线能谱, 得到 $5^\circ \times 5^\circ$ 月表区域对应的谱线。由于并不是每条记录谱线都有效, 排除明显错误的谱线后, 确定月表主要元素所需要的观测时间如表 5 所示。

表 5 确定月表主要元素所需观察时间

元素名称	岩石中质量(浓度)范围	所需观察时间/月
U	0.2~3.6 mg/kg	1
Th	1~14 mg/kg	1
K	400~4600 mg/kg	1
Ti	0~7%	2
Fe	3%~13%	4
Al	6%~13%	4
O	41%~46%	6
Si	18%~23%	9
Mn	2%~6%	10
Ca	8%~13%	12

6 结语

CE1-GRS 的解谱工作是一个复杂的过程, 由于探测器能量分辨率较低, 实测谱中拟合出的峰受到大量背景射线的干扰, 给月表放射性元素的定性和定量造成困难。本文采用 MCNP 蒙特卡罗程序对 CE1-GRS 绕月探测实验测量进行了模拟运算, 将实际实验条件和实验环境尽可能真实地在 MCNP 中重现, 并将模拟结果与实验结果比较。在没有排除各种本底及干扰的情况下, 可以对实测谱的部分特征峰进行定性, 辨识出复合峰并找出其组成来源, 对定量分析月表元素提供了有力的支持。

在获得足够充分的观测数据后, 下一步将对多种能量 γ 射线来源进行定性和定量模拟, 如 γ 射线与月表物质作用后的次级射线、宇宙线与卫星物质作用产生的多种射线等。进一步完善此 MCNP 模型。我国嫦娥二号卫星中使用了能量分辨率较高的 LaBr_3 探测器^[15-16], 已经获取了大量能谱数据, 期望我们的模拟与嫦娥二号的数据结合, 充分发掘卫星探测器测量数据。

参考文献:

- [1] OUYANG Ziyuan. Journal of Guizhou University of Technology(Nature Science Edition), 2003, **32**(6): 1. (in Chinese)
(欧阳自远. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2003, **32**(6): 1.)
- [2] LI Yongquan, LIU Jianzhong, OUYANG Ziyuan, et al. Acta Petrologica Sinica, 2007, **23**(5): 1169. (in Chinese)
(李泳泉, 刘建忠, 欧阳自远, 等. 岩石学报, 2007, **23**(5): 1169.)
- [3] HASEBE N, YAMASHITA N, OKUDAIRA O, et al. Advances In Space Research, 2008, **42**: 323.
- [4] ZOU Yongliao, OUYANG Ziyuan, XU Lin, et al. Quaternary Sciences, 2002, **22**(6): 533. (in Chinese)
(邹永廖, 欧阳自远, 徐琳, 等. 第四纪研究, 2002, **22**(6): 533.)
- [5] LAWRENCE D J, FELDMAN W C, BARRACLOUGH B L, et al. Science, 1998, **281**(4): 1984.
- [6] ROBERT C R. The 9th Lunar Planet Science Conference [C]. New York: Pergamon Press, 1978: 2961.
- [7] FELDMAN W C, BARRACLOUGH B L, FULLER K R, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1999, **422**: 562.
- [8] ADAMS J H, BHATTACHARYA M, LIN Z W, et al. Advances In Space Research, 2007, **40**: 338.
- [9] KOBAYASHI S, HASEBE N, SHIBAMURA E, et al. Space Sci Rev, 2010, **154**: 193.
- [10] BIELEFELD M J, REEDY R C, METZGER A E, et al. The 7th Lunar and Planetary Science Conference [C]. New York: Pergamon Press, 1976: 2661.
- [11] MA T, CHANG J, ZHANG N, et al. Advances In Space Research, 2008, **42**: 347.
- [12] SHU Shuangbao, CHANG Jin, CAI Mingsheng, et al. Acta Astronomica Sinica, 2006, **47**(2): 218. (in Chinese)
(舒双宝, 常进, 蔡明生, 等. 天文学报, 2006, **47**(2): 218.)
- [13] YAMASHITA N, HASEBE N, REEDY R C. Geophysical Research Letters, 2010, **37**: L10201.
- [14] PAUL L, RANDY L, JEFFREY G, et al. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 2006. **60**: 83.
- [15] XU Tao, LI Chunlai. Chinese Journal Of Space Science, 2001, **21**(4): 332.
- [16] ZOU Yongliao, ZHANG Liyan, LIU Jiazhong. Acta Geologica Sinica, 2011, **85**(6): 1299.

Monte Carlo Simulation and Analysis of γ Rays for the Important Elements of Lunar Surface

ZHANG Jingyao^{1, 2}, WANG Nanping^{1, 2}

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Geo-detection (China University of Geosciences, Beijing),

Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: It is a more complex data processing problem of the data of γ -ray spectrum, which were collected by Chang'E-1 from lunar surface. It is presented that MCNP simulation for the γ spectra, according to three kinds of physical events, such as natural radioactive elements emission, the γ rays induced by inelastic neutron scattering and neutron capture on the lunar surface in this paper. The simulated results were superimposed and compared with the measured spectrum by Chang'E-1. The results show that ^{40}K and ^{214}Bi can be identified from the measured data with our MCNP models.

Key words: detection of the moon; CE1-GRS; MCNP

Received date: 30 Mar. 2013; **Revised date:** 18 Apr. 2013

Corresponding author: WANG Nanping, E-mail: npwang@cugb.edu.cn.

<http://www.npr.ac.cn>