

# 玉兔号月球车粒子激发 X射线谱仪

汪锦州<sup>1</sup> 崔兴柱<sup>1</sup> 王焕玉<sup>1</sup> 胡一鸣<sup>2</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 中国科学院紫金山天文台 210008)

## 1. 引言

了解一颗行星,最基本的是了解它的化学成分。过去一个世纪,地球化学的主要工作是确定地面材料的化学组成,了解在地质过程中不同化学元素的行为方式,通过分析化学成分信息来解读地质过程。对月球的地质研究来说,化学成分数据具有相同的意义。

目前,通过月球化学成分的数据,科学家可以研究以下的科学问题:月球如何起源?月球起源与地球和太阳系的形成有什么关系?地球和月球之间关系到底有多密切?月亮具有什么样的地质历史以及它是如何与月球主体分开的?月海岩浆如何形成的以及何时喷发?月球角砾岩和月壤如何起源?月球化学成分起源于何处?最初月球是否是均一的成分?哪些化学成分是由于流星撞击引入的?哪种化学元素是由于太阳风带到月球上的?月球具有什么样的经济价值以及月球上的物质如何支撑未来人类空间的活动?

粒子激发X射线谱仪(APXS)是我国嫦娥三号巡视器机械臂上唯一的载荷,通过携带主动激发源激发月岩或月壤表面的元素,并探测其产生的特征荧光X射线,从而获得月球元素的种类及含量信息,实现“月表物质成分分析和可利用资源调查”任务,并为月球地质化学和演化过程提供重要依据。

粒子激发X射线谱仪在设计上有如下的需求:可以实现月表元素的特征X射线的激发;对月表元

素的特征射线进行高分辨的探测;适应月表极端温度环境(-180~+120℃);具备在轨标定功能,实现探测器性能的实时监测;具备距离感知能力,在增加特征射线统计量的同时,保证投放过程中探测器自身的安全。

## 2. 工作原理及系统设计

### 2.1 工作原理

当入射粒子或射线能量足够大,能够将靶材料原子结构中内层电子击出,使原子处于不稳定的激发态,为了使原子恢复到稳定的低能态,外层电子会向内跃迁补充到内层电子被激发而产生的空穴,同时将多余的能量以X射线形式释放,该射线能量为被激发的内层电子和向内跃迁的外层电子之间的能量差,由于不同元素具有不同的电子结构,其原子内部不同电子轨道间的能量差也各不相同,因此产生的X射线能量和强度均带有各自原子结构的印记特征,可以通过测量X射线的方式进行元素的定性和定量的鉴别。

粒子激发X射线谱仪通过自身携带的Fe-55和Cd-109同位素发射的X射线作为激发射线,使月表元素的内层电子被激发,从而产生特征X射线。特征射线被粒子激发X射线谱仪探测器接收,通过后端的电子学处理形成能谱信息。通过X射线的能量和强度信息,对月表元素成分和含量进行反演,得到月表元素的分布信息。

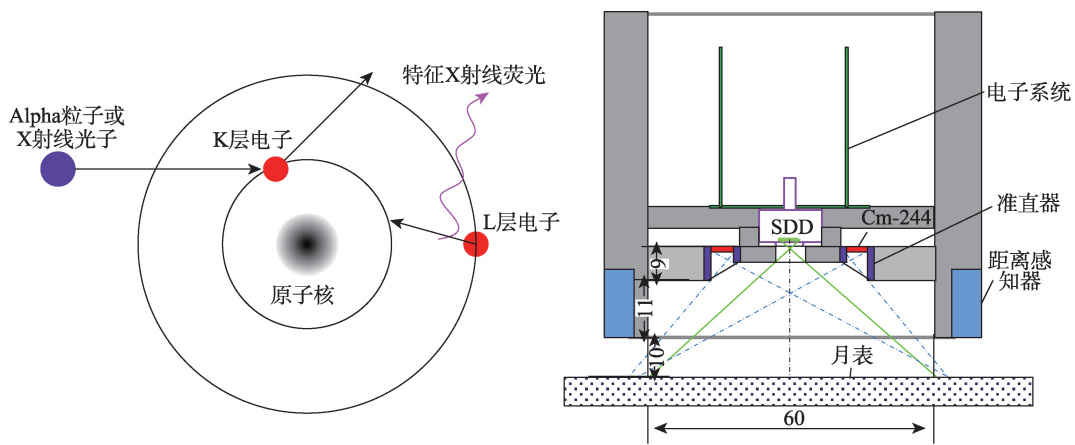


图1 特征X射线激发和发射原理图(左图)和粒子激发X射线谱仪工作原理图(右图)

## 2.2 系统设计

粒子激发X射线谱仪由探头、月夜生存装置(RHU)、在轨标定装置、电缆组件、数据采集电路板(含控制FPGA软件)组成,其系统设计如图2所示。

其中探头(如图3所示)安装于玉兔号月球车机械臂末端,集成了激发源、距离感知器、硅漂移探测器及成形放大电路等,总质量仅为750 g。

月夜生存装置位于玉兔号车体的面板上,通过Pu-238同位素为燃料的同位素加热单元(RHU)在月夜为探头提供热量,保证在月夜-180℃的低温条件下,探头内部各部分不会失效。

在轨标定装置采用标准的玄武岩材料制备,位于玉兔号车体面板上,作为标准样品对探头的性能

指标进行实时监控。

电子学板对探头进行电源供电,并对探头产生的模拟信号进行处理,对整个载荷的遥控、遥测信号进行采集,完成数据存储和数据通讯功能。并响应来自载荷电控箱公共单元的注入指令。

## 2.3 探头设计

探头安装在巡视器机械臂末端,主要由硅漂移探测器(SDD)、前置放大电路、激发源组件、红外距离感知器和外筒等支撑安装结构组成。

### 2.3.1 硅漂移探测器

硅漂移探测器(Silicon Drift Detector,简称SDD)是半导体探测器的一种,用来探测X射线,广泛应用在能量色散型X射线荧光光谱仪(XRF)或

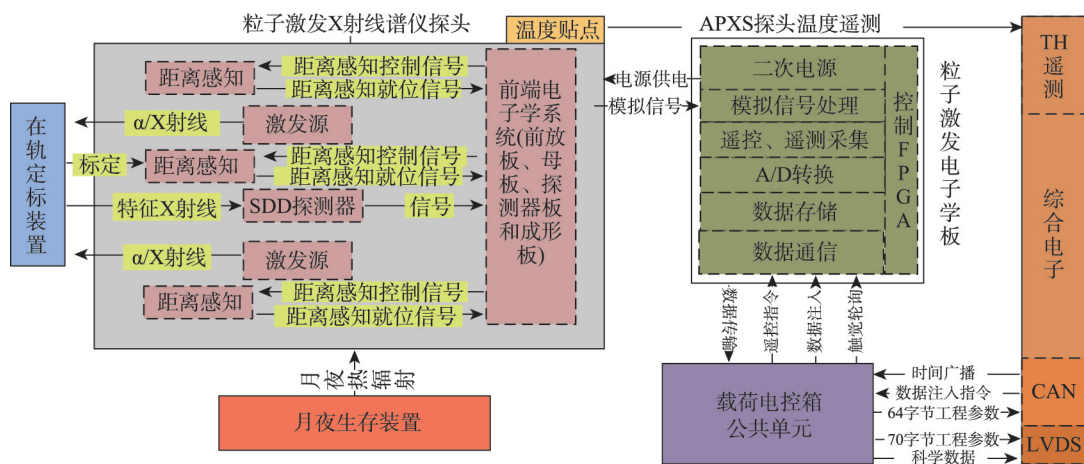


图2 APXS探测器系统结构设计

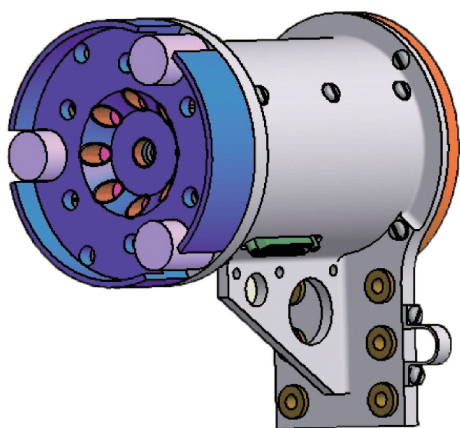


图3 探头外观

者X射线能谱仪(EDS)上。它的主要结构是一块低掺杂的高阻硅,背面的辐射入射处有一层很薄的异质突变结,正面的异质掺杂电极设计成间隔很短的条纹,通常做成同心圆环状,收集极(阳极)位于探测器中央,阳极面积非常小,这样,阳极电容也非常小,减小了串联噪声分量,降低了整个电子学噪声,并使最佳成形时间变快,具有高能量分辨率和高计数率特点;反转偏置场在电极间逐步增加,形成平行表面的电场分量,耗尽层电离辐射产生的电子受该电场力驱动,向极低电容的收集阳极“漂移”,形成计数电流,从而在外电路形成“信号脉冲”。“信号脉冲”幅度正比于入射射线的能量,分析脉冲的幅度就可以了解入射射线的能量。

### 2.3.2 距离感知原理

为了避免探头触碰月表引起探头损坏,同时兼顾尽可能接近月球表面,使激发源效果最大化;依据单位时间内探测计数与探测距离平方近似成反比的关系,利用计数率用于判断探测距离,给出机械臂所需的就位状态信息。这种测距方案,充分利用自身资源,不增加额外开支,并且对周围环境要求低,具有较强的适应性。

### 2.3.3 前端放大电路

X射线进入SDD探测器,通过沉积能量形成电子空穴对,电子空穴对通过SDD上的电场收集,形成电信号,其电荷量与X射线能量成正比,前端放大电路采用低噪声电荷灵敏放大器,对SDD产生的弱信号,经过放大、成形、峰值保持、A/D转换等一

些列电路处理后,形成能谱数据下传,如图4所示。

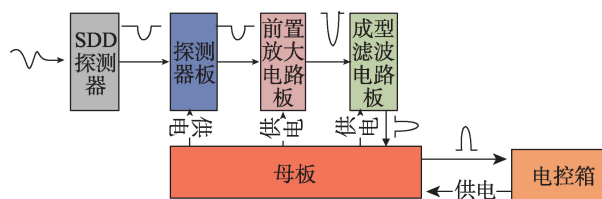


图4 APXS探测流程示意图

## 2.4 温度适应性设计

由于月表月球昼夜温差大,最高气温达到+120℃,最低气温约-180℃,远远超出仪器正常工作温度(-35~+35℃),或存储温度(-65~+135℃),仅有探头是无法抵御低温和高温,需要采取保暖、降温措施。

月夜时,探头对准月夜生存装置,如图5,利用钚-238(<sup>238</sup>Pu)同位素加热单元(RHU)自发衰变产生的热量保暖,避免月夜低温冻坏探头。<sup>238</sup>Pu(RHU)半衰期为88年,能几十年如一日的长时间稳定工作,不受任何外界环境影响。

月昼时,探头离开月夜生存装置,回收到巡视器侧畔,如图6,利用巡视器遮挡太阳光,避免直射,类似于人站在遮阳伞下,可以降低温度。另外,在探头结构设计时,各零件充分耦合,增加接触面积,减小热阻并在末端设计了散热面,涂覆高发射率的白漆,减小红外线的影响,有效的散发热量,降低温度。

探头通过使用聚酰亚胺垫片后再安装到巡视器机械臂末端,并且穿上一种多层隔热阻件材料制成的衣服,可实现双向隔热。温度高时热量无法从外面传入探测器内部,月夜时探测器内部的热量也不会流失。

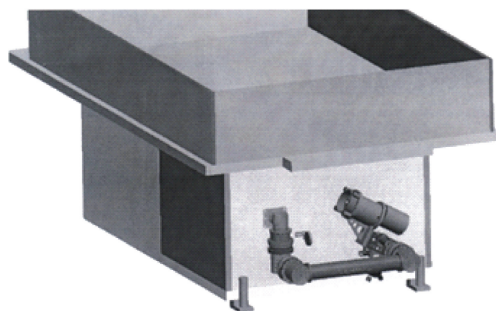


图5 探头摆放位置示意图-月夜

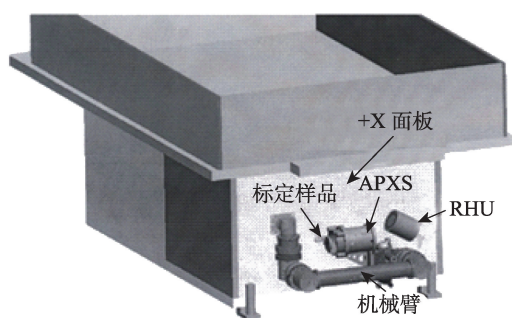


图6 探头摆放位置示意图-月昼

## 2.5 在轨定标装置设计

为了及时了解探头性能是否发生变化,方便而准确的反演月表元素丰度数据,设计了在轨定标装置:采用玄武岩作为标准样品,标准样品被激发能谱在地面可测,其被放射源激发能谱不会随环境变化。由于玄武岩化学性质稳定,元素种类及含量在月球环境下不会发生变化,因此可以作为在轨标定的参照物。探头探测月表前,先测试在轨定标装置,得到一组数据,通过对比前期测试数据或地面测试数据,能判别探头性能是否发生变化,类似于仪器自检功能

## 2.6 其他部件设计

电缆组件实现探头和综合电子学 APXS 电子学板间的电连接,包括:连接器、线缆、屏蔽网、防护

套,属于高性能产品,与一般电缆组件相比,具有绝缘电阻高,温度适应范围宽,抗震动能力强,可靠性高,机械和电气性能优良等特点。

数据采集电路板(含控制 FPGA 软件)由电控箱二次电源转换电路,数据采集电路和通讯接口电路等部分构成。数据采集电路包含主放大器、单道分析器、屏蔽控制电路、峰值检测和保持电路,探测器前端电子学和公用的数据采集与通讯。

## 3. 与国际同类产品对比

近期的欧空局猎兔犬二号的 X 射线谱仪,俄罗斯的福布斯号的阿尔法-X 装置,美国航空航天局火星探路者、机遇号和勇气号、火星实验室的粒子激发 X 射线谱仪,均采用了硅半导体探测器和主动激发技术。与国际这些同类设备对比,粒子激发 X 射线谱仪是唯一一台自主温控的设备,其工作温度范围、能量分辨率均高于其他设备,详见表 1。

## 4. 在轨工作成果

粒子激发 X 射线谱仪搭载嫦娥三号发射到月球后,成功适应了月球表面的极端温度环境,其在轨分辨率好于 135 eV@5.9 keV,达到国际领先水平。在轨工作性能稳定,于 2013 年 12 月 23 日,完成了首

表 1 空间主动激发元素探测谱仪对比

任务名称	猎兔犬二号	火星漫步者	火星实验室	罗塞塔	嫦娥三号
国家	欧洲	美国	美国	欧洲	中国
仪器名称	XRFS	APXS	APXS	APXS	APXS
研究对象	火星	火星	火星	67P/楚留莫夫-格拉希门克彗星	月球
发射时间	2003	2003	2011	2004	2013
类型	Si-PIN	SDD	SDD	SDD	SDD
能区	1~24 keV	0.9~17 keV	0.79~25 keV	1~15 keV	0.5~20 keV
分辨率	390 eV @5.9 keV	160 eV @5.9 keV	143 eV @5.9 keV	180 eV @5.9 keV	134 eV @5.9 keV
激发源	105.6 MBq Fe-55 8.77 MBq Cd-109	30 mCi Cm-244	30 mCi Cm-244 +30 mCi Cm-244	30 mCi Cm-244	280 mCi Fe-55+20 mCi Cd-109
质量	0.156 kg	0.25 kg	0.362 kg	0.64 kg	0.754 kg
功耗	2.7 W	0.62 W	8 W	1.5 W	1.2 W
工作温度	-23 ℃	-40 ℃	-130~0 ℃	-40 ℃	-35~35 ℃
温控	平台温控	平台温控	平台温控	平台温控	自主温控

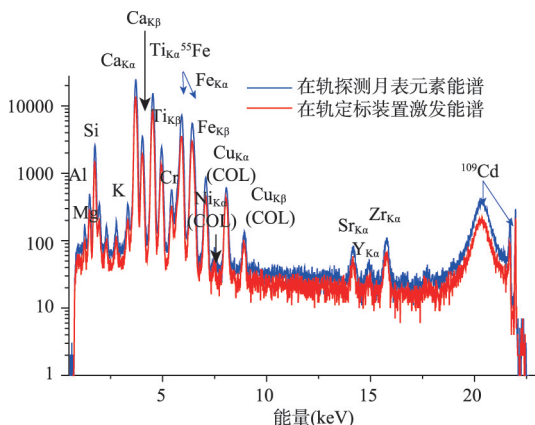


图7 粒子激发X射线谱仪在轨测试能谱(+30℃)

次在轨标定工作,获取了在轨标定能谱;2013年12月25日开始,粒子激发X射线谱仪完成了三次月球表面的“实时原位”巡视探测,成功获得了虹湾着陆点的Mg、Al、Si、K、Ca、Ti和Fe 7种主量元素的含量及Cr、Sr、Y和Zr 4种微量元素的高分辨特征能谱(如图7所示),该数据对研究月球地质演化历史有重要价值。

CE-3月壤成分的分析结果与阿波罗12号的钛铁矿玄武岩返回样品具有一定的相似性,同时其铝元素含量也与阿波罗14的高铝样品含量很相似(如

表2 着陆区月壤成分分析结果及与Apollo-12、Apollo-14的钛铁矿玄武岩比较

Average wt.%	CE-3	A-12 钛铁矿玄武岩	A-14 玄武岩
SiO <sub>2</sub>	41.62	43.82	47.03
TiO <sub>2</sub>	4.31	4.57	2.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.11	9.02	12.67
FeO	22.24	21.16	16.38
MgO	8.61	9.99	9.37
CaO	9.72	9.93	10.77

表2所示)。

CE-3号月壤成分具有很高的Fe和Al元素含量,表明其成分可能来自下伏月海玄武岩的溢出,也可能是下伏玄武岩与附近的低钛玄武岩或高地矿物混合的结果,较高的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>支持混有高地斜长岩的推断,但较高的Fe含量又与这个推断矛盾。三个探测点的数据表明,着陆区月壤成分具有很好的—致性,这表明元素成分特征不太可能是混合引起的。着陆区的光学成像数据表明,周围的岩石中含有很多的斜长岩的成分,这支持了该地区岩石成分为高铝成分火成岩的推断。因此,CE-3着陆区的土壤成分可能主要来自下伏的月海玄武岩的岩浆流。

科苑快讯

物理学与财富不平等

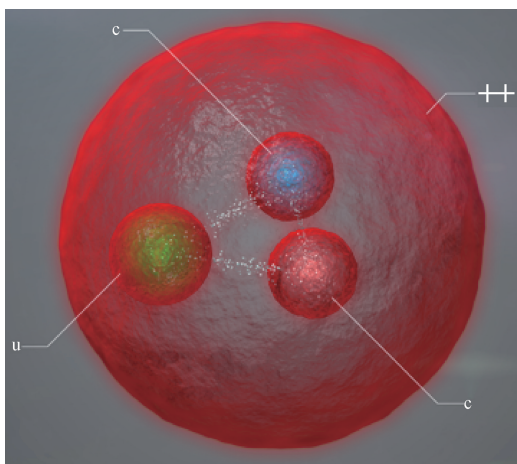


财富不平等,是一个当前颇受关注的话题,这是物理定律不可避免的结果。这一结论来自两位学者的研究结果,他们是美国杜克大学(Duke University)的贝扬(A. Bejan)和巴西库里蒂巴市联邦大学(Federal University of Paraná)的埃雷拉(M. Errera)。他们把财富分布和他们称为社会生活的“所有流的运动”联系起来。这种实际物理运动可以对应不同的方式,比如每年大量的燃油消耗,这都导致了相同比例的行为。这自然产生了财富的层级分布,随着经济发展,情况会愈加严重,通过以往经验可以预言,下个世纪的财富分布仍然是洛伦兹型的。

(高凌云编译自2017年5月19日《欧洲核子中心快报》)

## 科苑快讯

## LHCb 实验宣布发现双粲重子



LHCb 实验发现新粒子的示意图:包含两个粲夸克和一个上夸克(图片来源 Daniel Dominguez/CERN)

2017年7月6日,在威尼斯召开的EPS高能物理会议上,欧洲核子研究中心大型强子对撞机上的LHCb实验宣布发现由两个粲夸克和一个上夸克组成的新粒子 $\Xi_{cc}^{++}$ ( $\Xi_{cc}^{++}$ )。尽管目前的理论早已预言在重子家族中存在此粒子,但是这种包含两个重夸克的重子确实让物理学家们搜寻了很多年。这个最新确认的粒子质量大约为3621MeV,比我们最熟悉的重子——质子——的质量大了四倍,这主要归功于它的双粲夸克组分。这是该类粒子首次被明确探测到。

我们身边几乎所有可见的物质都是由重子组成,重子通常由3个夸克组成,最著名的就是质子和中子。但是,自然界一共存在六种夸克,理论上它们可以通过许多不同的组合形成各类重子。迄今为止所观测到的重子最多只包含一个重夸克。

“发现双重夸克重子是非常有趣的事情,因为它将为我们提供一个独特的工具来进一步研究量

子色动力学——用于描述强相互作用(四种基本作用力之一)的理论,”LHCb合作组的新发言人帕萨洛瓦(G. Passaleva)说到,“这种粒子能够帮助我们提高理论的预言能力。”合作组前发言人威尔金森(G. Wilkinson)补充说:“在普通重子中,三个夸克遵循精心计算的轨迹彼此绕转,但是双重夸克重子不同,它的行为更像是一个行星系统,其中两个重夸克类似于两个重星相互绕转,而轻夸克的轨道则围绕双星系统转动。”

研究 $\Xi_{cc}^{++}$ 的性质有助于我们建立关于由两个重夸克和一个轻夸克组成的系统如何运转的理论。通过精确测量产生和衰变过程,以及这种新粒子的寿命可以得到重要的启示。

事实证明观测这种新重子对科学家来说是一个挑战,但同时LHC重夸克的高产生率和LHCb实验的独特优势(LHCb可以以非常高的效率鉴别衰变产物)也为其提供了可能。 $\Xi_{cc}^{++}$ 重子可以通过它衰变产生的 $\Lambda_c^+$ 重子和三个轻一些的介子 $K^-, \pi^+$ 和 $\pi^+$ 进行鉴别。

LHCb观测到 $\Xi_{cc}^{++}$ 为探寻其他双重夸克重子家族的代表燃起了希望。LHC正在着手展开对它们的搜寻。

以上结果基于大型强子对撞机上第二个运行周期13TeV数据分析得到,并利用第一个运行周期的8TeV数据加以确认。合作组已经向《物理评论快报》(*Physical Review Letters*)提交了一份论文报告此次发现。

(海容编译自2017年7月6日 *CERN Accelerating science*)