

· 专题:双清论坛“月球科研站的关键科学问题” ·

月球粒子辐射探测与新粒子寻找*

江敏^{1,2†} 徐来林^{1,3†} 赵政国^{1,3**}

1. 中国科学技术大学 近代物理系,合肥 230026
2. 中国科学技术大学 中国科学院微观磁共振重点实验室,合肥 230026
3. 中国科学技术大学 核探测与核电子学国家重点实验室,合肥 230026

[摘要] 随着月球探索的深入,月球展现出了在科学研究方面的巨大潜力,其独特的环境将为研究基本粒子物理、天体和宇宙学以及寻找新粒子提供重大机遇。空间粒子辐射携带着天体和宇宙自身起源与演化的信息,对空间粒子辐射的探测是研究天体和宇宙学的重要和独特的手段。空间粒子辐射与生命体、材料、仪器等的作用效应对在空间和月球上开展相关的研究是至关重要的。月球的独特环境也为寻找轴子和磁单极子等超出粒子物理标准模型的新粒子提供了新窗口。本文将讨论月球粒子辐射探测,以及在月球上利用超高灵敏度的探测方法和手段寻找新粒子。

[关键词] 深空探测;空间粒子辐射;超越标准模型;轴子;磁单极子;量子传感技术

瞭望无际的星空,历经日起日落,月圆月缺,我们好奇浩瀚的宇宙是如何产生的,她将如何发展下去,它的边际在哪?组成宇宙万物的基本成分是什么?这些看似普通在孩提时就常问的问题,恰恰是人类探索至今尚无答案的最基本最重大的科学问题。

在过去的近百年,人类通过各种手段、方法来探索天空和宇宙:用望远镜、粒子探测器等通过地面、高山、高空气球、卫星和空间站来探测天体和宇宙的奥秘。例如,天文和宇宙学家们通过望远镜发现了众多的天体、星系和宇宙起源、演变的现象;在60年代粒子加速器出现之前,众多的基本粒子如正电子、缪子、 π 和K介子、反质子等,都是利用粒子探测器在宇宙线中发现的。

空间粒子辐射携带着天体、宇宙起源与演化的信息,是研究基本粒子物理、天体和宇宙学以及寻找新粒子的独特场所。另一方面,粒子和放射性辐射效应引导的生物体、器件、材料及仪器损伤,对在月球、空间进行的探索构成严重的威胁。因此,基于空间的粒子和辐射探测,尤其是近些年将对撞机上高



梁何利基金科学与技术进步奖物理学奖等。

赵政国 中国科学技术大学教授,中国科学院院士。曾任北京谱仪实验负责人,中国高能物理分会主任;现任中国科学技术大学粒子物理与技术研究中心主任,中国物理学会副理事长。长期从事粒子物理实验研究。曾获中国科学院杰出科技成就奖一等奖、国家自然科学基金二等奖、何



江敏 博士,中国科学技术大学副研究员,主要研究方向为自旋量子精密测量及其应用研究,包括超灵敏原子磁力计、量子放大器和超越标准模型新物理等。发表主要学术论文20余篇,入选中国科学院特别研究助理资助人才项目。



徐来林 博士,中国科学技术大学特任教授,博士生导师,主要研究方向为粒子物理实验,从事大型强子对撞机上的实验物理研究和新型粒子辐射探测器的研制。发表主要学术论文30余篇,入选国家创新人才计划—青年项目支持。

能物理实验发展起来的新型粒子探测技术应用

收稿日期:2022-02-28;修回日期:2022-08-11

† 共同第一作者

* 本文根据第302期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email:zhaozg@ustc.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(12004371)的资助。

间粒子和辐射探测,不仅是研究宇宙学、天体粒子物理和寻找新物理现象的重要手段,同时也是建立空间站、载人登月和建立月球基地所需的重要科学依据和技术支撑。

月球是地球唯一的天然卫星。它的直径大约是地球的四分之一,离地球的距离大约是 384 400 公里。月球被认为被真空包围,月球上没有明显的水、大气层和磁场,它的表面重力约为地球的六分之一。月球是地球以外唯一人类踏足的地方。1969 年 7 月 21 日(协调世界时),美国宇航员尼尔·阿姆斯特朗成为第一个在月球上行走的人,从此开启了一股人类探索月球的研究热潮。前后有 12 个人登上月球。我国于 2007 年开始了对月球的探测,在过去十余年取得世界瞩目的成就:分别发射了“嫦娥”1、2、4 号卫星,在离月约 100~200 公里的月球轨道进行了区分电荷的高能粒子通量、月表中子、太阳爆质子、电子和阿耳法粒子探测。2013 年,中国第一个无人登月探测器“嫦娥 3 号”在月面成功实施软着陆,巡视器搭载了粒子激发 X 射线谱仪等科学仪器。2020 年“嫦娥 5 号”登月勘探采样返回,是人类 44 年以来再次获得月球样品,标志着我国航天事业发展中里程碑式的新跨越。

2021 年 4 月,中国国家航天局和俄罗斯国家航天集团公司发表了关于合作建设国际月球科研站的联合声明,6 月双方向国际社会发布了国际月球科研站路线图和国际合作伙伴指南。国际月球科研站旨在月球表面或月球轨道上建设可进行月球自身探索和利用、月基观测、基础科学实验和技术验证等多学科多目标科研活动的长期自主运行、远景有人参与的综合性科学实验设施。月球科研站的建设将分为勘、建、用三个工程阶段。预计到 2035 年,国际月球科研站能源、通讯、导航、远程运输、天地往返等系统将完成建设,2035 年后进入使用阶段。在月球上建立科学实验基地的宏伟计划将为人类探索月球、太阳和宇宙提供重要独特的平台和新的机遇。根据月球的环境和特点,我们建议在月球上开展粒子与辐射探测和寻找超出标准模型的新粒子实验。

1 月球粒子辐射探测

月球表面的粒子辐射环境探测是人类了解月球演化、空间环境状态及变化规律等重大科学问题的重要手段,同时也是保障人类空间活动安全的必要依据,是月球科研站建设和运作不可或缺的一项重要任务。

1.1 月球探索任务中空间粒子辐射环境特点

月球上粒子辐射环境较为复杂,除了银河宇宙线(Galactic Cosmic Ray, GCR)、太阳高能粒子(Solar Energetic Particle, SEP)事件,还有这些粒子与月壤产生的反照辐射,以及月壤天然放射性核素。GCR 由能量极高、通量极低的带电粒子组成,其中重子成分即质子和重离子占 98%,电子和正电子占 2%^[1]。重子成分中质子占 87%,氦离子占 12%,其它重离子占 1%。重离子成分中的高能粒子尤其是高原子序数的高能粒子,有着非常高的线性能量传输(Line Energy Transfer, LET)谱和很强的穿透性,具有很强的生物辐射损伤效应。SEP 事件属于偶发事件,只有在太阳活动比较活跃,如日冕物质抛射或太阳耀斑时,才会有大量高能粒子发出,能量范围从几十 keV 至 GeV,其主要成分是质子、电子和少量的重离子。SEP 与 GCR 成反相关,即当太阳活动增强时银河宇宙射线减弱,这被称为太阳调制^[2]。GCR 和 SEP 事件与月壤作用均可能发生反照辐射,产生的次级粒子是月球表面中子最主要的来源,因此中子剂量受银河宇宙射线和太阳质子事件的影响较大。月球上有天然放射性核素如钍系、铀系、钾等,这些核素的衰变是月球上伽马射线的主要来源。

月球表面的粒子辐射环境给航天员带来了严重的健康风险,异常的辐射剂量甚至可威胁航天员的生命安全。研究空间粒子辐射对人体器官的损伤机制、遗传变异的影响、防控疾病风险,以及研究更有效的物理和生物医学防护技术,是航天医学领域的首要任务之一^[3]。除此之外,空间中的粒子和射线会对在航天器载荷中产生电离辐射和非电离辐射,如单粒子效应、位移损伤效应、辐射总剂量效应、表面充电效应、深层充电效应等,对材料和元器件造成损伤,引发航天器的功能异常和失效^[4]。因而空间粒子辐射环境也是航天工程应用关注的热点领域。

1.2 月球粒子辐射探测现状

迄今为止,人类已经发射了超过 200 颗月球探测器,成功进行了 80 余次月球探测,包括 32 次绕月探测和 22 次软着陆探测(据月球与行星研究所网站 2021 年统计, <http://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/>),其中包括 6 次“阿波罗”载人登月探测。历次月球探测都搭载了多种有效科学载荷,包含了粒子和射线探测谱仪,以对月球辐射环境以及相应的辐射效应进行了探测。人类已经获得了一定的科学探测数据,深化了对月球的科学认知,其中包括月表和月球轨道粒子辐射环境的测量数据。

下面将对 21 世纪以来国内外月球粒子辐射探测器及其科学成果进行简要回顾。

1.2.1 “月船 1 号”(Chandrayaan-1)

“月船 1 号”是印度 2008 年发射的一个探测器,运行在月球 100 公里的极轨道上。上面搭载了一个微型剂量谱仪,辐射剂量监测器(RADIation Monitor, RADOM)^[5],用来监测运行轨道的辐射环境。如图 1A 所示,RADOM 只有约 $10 \times 4 \times 2 \text{ cm}^3$ 的体积和约 0.1 kg 的重量,主要由一个面积 2 cm^2 、厚度 0.3 mm 的单层半导体探测器和一个 12 通道的模数转换器组成。RADOM 能探测的最低电子和质子能量分别为 0.85 MeV 和 17.5 MeV。

在 100 km 的月球圆轨道处,经过 3 545 小时的测量,RADOM 测得的平均粒子通量为 $2.45 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,吸收剂量率为 $9.46 \mu\text{Gy h}^{-1}$ 。RADOM 对粒子通量随着月球轨道高度的变化进行了测量(如图 1B),当运行轨道高度在 92~118 km 范围内变化时,剂量率和通量与高度有着显著的正相关性。在 200 km 高度,RADOM 测得的平均粒子通量和剂量率上升至 $2.73 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $10.7 \mu\text{Gy h}^{-1}$ 。这一上升的原因是:近月轨道的粒子辐射效应主要来源于银河系宇宙线,轨道越高,月球对银河系宇宙线屏蔽减小。在月球轨道测量过程中,平均粒子通量和剂量率整体波动较小,被认为是与该时期太阳活动相对稳定有关。

1.2.2 “月球勘测轨道器”(Lunar Reconnaissance Orbiter)

2009 年,作为美国“重返月球”战略计划的第一步,美国发射了“月球勘测轨道器”,并搭载了两台粒子辐射探测器—辐射效应宇宙射线望远镜(Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation,CRaTER)^[6]和月球勘探中子探测器(Lunar Exploration Neutron Detector,LEND)^[7]。其中,CRaTER 对月球轨道电

离总剂量和剂量率进行测量,LEND 用来测量月球中子辐射。LRO 在 2009 年 9 月进入其主要任务轨道—距月球表面 50 km 的月球极地轨道,在 2015 年 5 月轨道高度调整至 20 km 的高度进行掠月飞行,其预期服役时间为 3 年,经多次延长仍在月球轨道运行。

CRaTER 的主要科学目标是测量月球整体的辐射环境和研究其生物效应。CRaTER 由两部分构成^[6],如图 2A 和 2B 所示,左边梯形铝盒为电子学系统,右边为望远镜探测器系统。望远镜系统由上中下三个硅探测器模块和两块间隔的 A-150 组织等效塑料组成的圆柱形“三明治”结构。每个硅探测器模块由一厚一薄的两个平面型 P-in-N 硅探测器组成,直径均为 35 mm,厚度分别为 $1\,000 \mu\text{m}$ 和 $140 \mu\text{m}$ 。薄硅探测器主要对高能量沉积(上限为 300 MeV)的粒子灵敏,厚硅探测器对低能量沉积(上限为 88 MeV)的粒子有更好的响应。两块圆柱形 A-150 组织等效塑料的直径为 35 mm,厚度分别为 54 mm 和 27 mm,用于研究在月球辐射环境下的生物体响应效应。整个 CRaTER 载荷的体积约为 $24.1 \times 23.0 \times 15.9 \text{ cm}^3$,重量为 5.5 kg,功耗为 6.7 W。CRaTER 预期的 LET 有效测量范围在 $0.09 \text{ keV}/\mu\text{m} \sim 2.2 \text{ MeV}/\mu\text{m}$,既可以测量宇宙线产生的粒子辐射剂量,也可以测量月球表面反照产生的粒子辐射剂量。

CRaTER 的测量数据显示,在太阳极小期(2009—2010 年,第 24 个太阳周期起始阶段),50 km 的月球轨道处的平均总剂量为 $372 \mu\text{Gy/d}$,其中宇宙线贡献占比约为 91.4%,月球表面的反照辐射贡献了约 8.6%的辐射剂量(包括 3.1%的质子和 2.2%的电子)^[9]。CRaTER 的测量数据还给出了详细的 LET 谱,如图 2C 所示。图 2D 显示了 CRaTER 测量的能量在 180 MeV 以上的质子的通

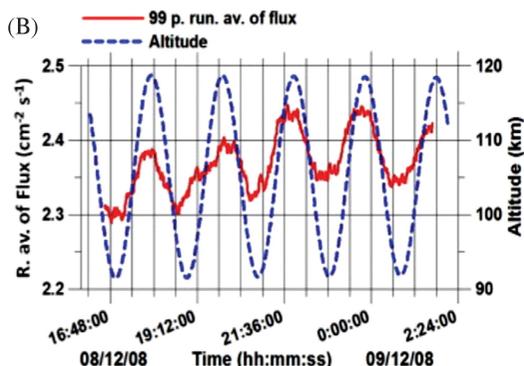


图 1 “月船 1 号”搭载的辐射剂量监测器 RADOM^[5]

(A) 探测器实物图, (B) RADOM 的粒子通量测量随着月球轨道高度的变化

量记录。结果显示宇宙线通量与太阳活动周期有强烈的负相关性,两个峰值区间 2009—2010 和 2018—2019 刚好对应了两个太阳极小期^[8]。

LEND^[7]的主要科学目标是测量月球表面产生的中子辐射和 LRO 轨道上的宇宙线中子辐射。这些中子测量结果主要用于勘探月球表面氢元素的丰度分布,并利用中子计数率变化在月球极地寻找水、冰存在的证据,同时可以用来研究月球表面的整体中子辐射水平。LEND 载荷体积为 $46 \times 46 \times 44 \text{ cm}^3$,总重量达 26.3 kg;其结构设计较为复杂(如图 3A),主要由一个准直模块(Module of Collimation, MC)、一个探测器以及电子学模块(Modules of Sensors and Electronics, MSE)组成。MC 包含 4 个准直筒,由聚乙烯和硼-10 材料组成。MSE 由 8 个 ^3He 正比计数器和一个氙晶体探测器组成,其中 4 个 ^3He 正比计数器被镉箔包裹置于 4 个准直筒内(Collimated Sensors of Epithermal Neutrons, CSEN),用于测量超热中子;另外 4 个 ^3He 正比计数器置于准直筒外,并且其中一个也被镉箔包裹,用于测量超热中子(Sensor of Epithermal Neutrons, SETN),另外未被包裹的用

于测量热中子(Sensors of Thermal Neutrons, STN);氙晶体探测器被一个反符合塑料闪烁探测器包围起来,二者构成一个高能中子探测器(Sensor of High-energy Neutrons, SHEN)。LEND 的预期探测灵敏度为能量不超过 0.4 eV 的热中子、0.4~100 eV 的超热中子和 0.3~15 MeV 的高能中子。

LEND 利用 2009—2014 年运行期间收集的测量数据(如图 3B),获得了月球表面的 0.4~1 keV 能量范围内超热中子的通量为 $2 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$;并且测量了中子通量随着时间变化的曲线^[10]。LEND 测得的月表中子通量变化与第 23~24 个太阳周期相吻合,在 2010 年初达到峰值,正处于太阳极小期。

1.2.3 “嫦娥 1 号”(CE-1)与“嫦娥 2 号”(CE-2)

“嫦娥 1 号”是我国第一颗探月卫星,在 2007 年发射,运行在月面 200 km 的轨道上。CE-2 作为 CE-1^[11]的备份星经技术改进后,于 2010 年发射,运行在 100 km 的月球轨道上。两颗卫星均搭载了一台高能粒子探测器(HPD),其科学目标是探测月球空间的高能带电粒子成分、能谱、通量和随时间的变化特征等。HPD 由 3 片半导体硅探测器组成,载荷尺寸为 $15 \times 12 \times 17.5 \text{ cm}^3$,重量 2.4 kg,如图 4 所示。

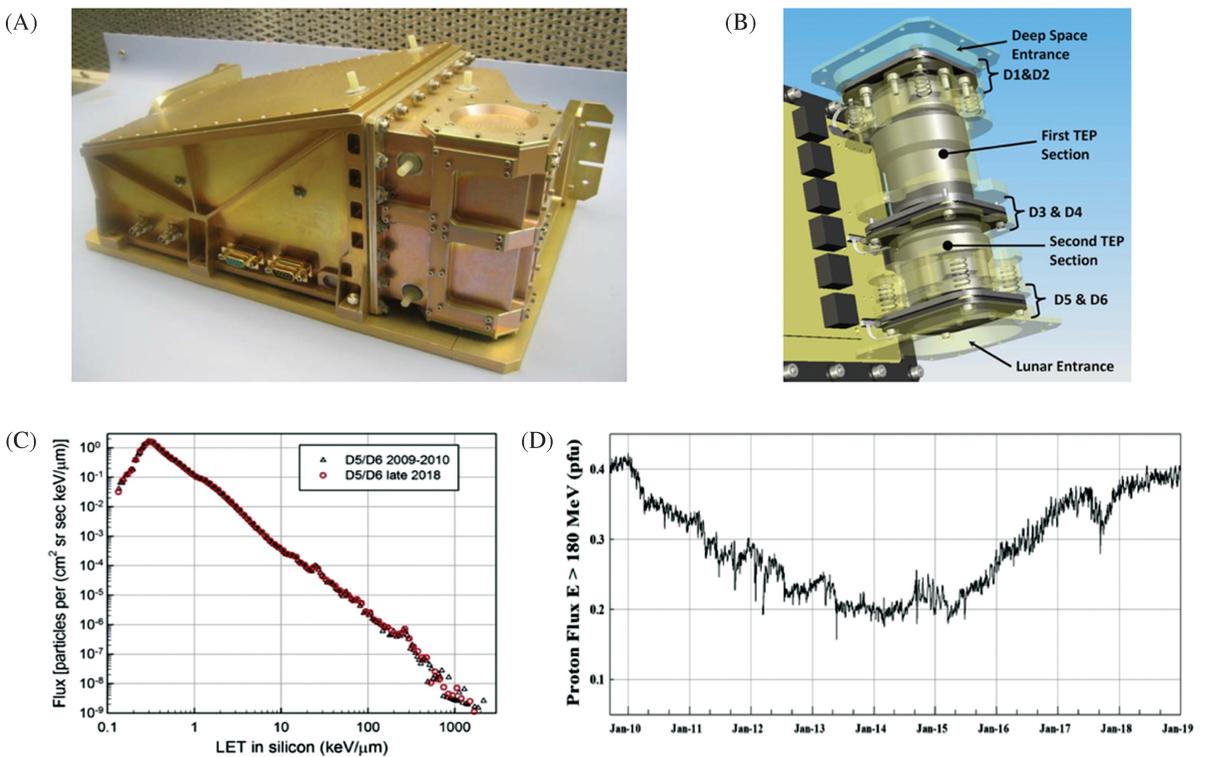


图 2 CRaTER 装置图^[6]

(A) CRATER 装置的电子学系统, (B) CRATER 装置的望远镜探测器系统, (C) 电子学系统 CRaTER 的 LET 谱, (D) 质子通量谱^[8]

HPD 的观测对象是能量区间在 4~400 MeV 内的 6 个能道的质子、>100 keV 和 >2 MeV 两个能道的电子以及 3 个重离子能道,主要探测目标是针对可能诱发卫星单粒子效应和卫星充电效应,威胁卫星安全的高能粒子种类和能谱。HPD 的观测结果表明,在太阳活动低年,100~200 km 的月球轨道上 4~400 MeV 高能质子通量约为 $0.2(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s} \cdot \text{MeV})^{-1}$, 0.1~2 MeV 电子通量约为 $41.2(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s} \cdot \text{MeV})^{-1}$, >2 MeV 电子通量约为 $0.2\sim 3(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s} \cdot \text{MeV})^{-1}$ [11]。

1.2.4 “嫦娥 4 号”(CE-4)

“嫦娥 4 号”于 2018 年 12 月 8 日成功发射,并在位于月球背面的艾特肯盆地着陆。CE-4 搭载的中德合作的月表中子与辐射剂量探测仪(Lunar Lander Neutron and Dosimetry, LND) [12],可以测量月球表面的辐射剂量率、通量以及月球表面快中

子能谱等。

LND 由 10 片厚度为 500 μm 的双灵敏区硅探测器(编号为 A-J)组成一个复合望远镜探测系统(如图 5A)。每片硅探测器大小为约 30 mm 的正方形,被分割为内灵敏区和外围两部分,内灵敏区为大小约 21 mm 的正方形。总吸收剂量和剂量率通过探测器 B 测量,中性粒子的吸收剂量和剂量率通过探测器 C 的内灵敏区 C1 测量,紧密靠近的探测器 B 和 D 以及探测器 C 的外灵敏区 C2 作为反符合用于区别带电粒子,LET 谱由 dE/dx 确定。LND 安装在 CE-4 着陆器的有效载荷舱内,舱门在寒冷的月夜关闭,在月昼时打开。

根据 LND 在 2019 年 5 月至 2021 年 1 月两年时间共 21 个月昼期间的测量数据,得到月球表面平均剂量率为 $12.66 \pm 0.45 \mu\text{Gyh}^{-1}$,其中中性粒子的平均剂量率为 $2.67 \pm 0.16 \mu\text{Gyh}^{-1}$,占总剂

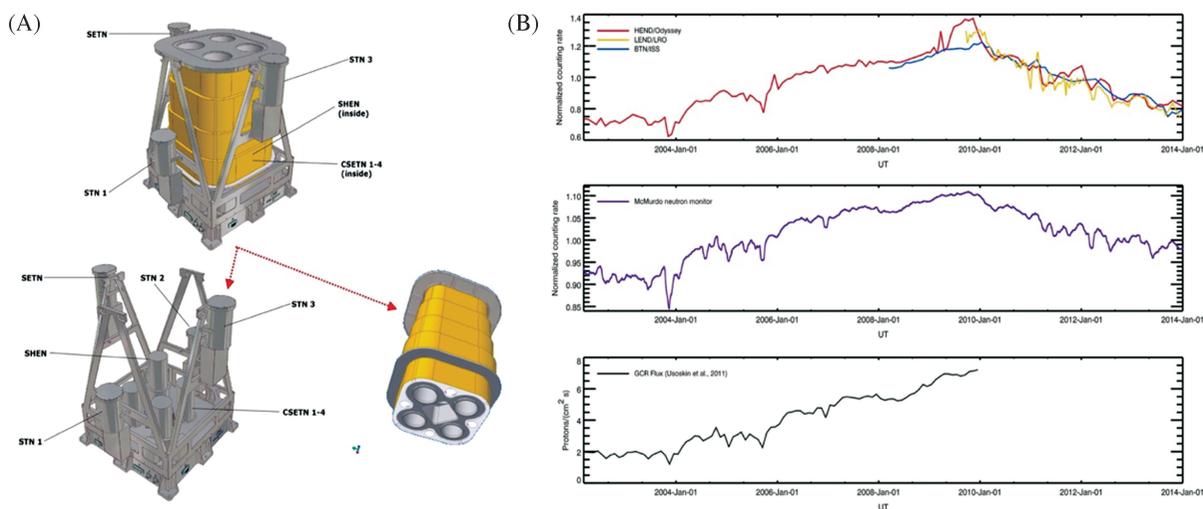


图 3 (A) LEND 结构示意图 [7], (B) 月球表面中子辐射相对通量的长期变化曲线 [10]

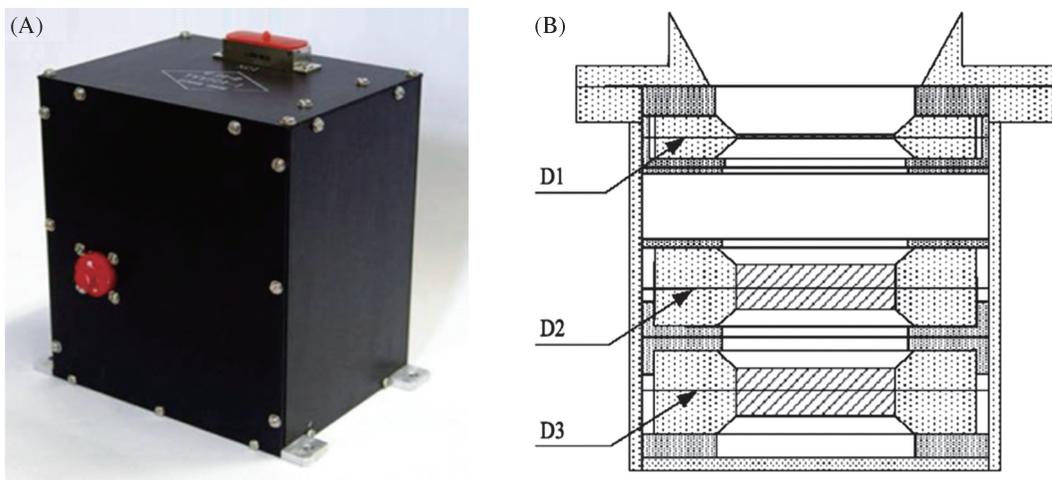


图 4 “嫦娥”探月卫星上的太阳高能粒子探测器 [11]

量的 21%，后者与 CRaTER 的测量结果在误差范围内相吻合^[13]。这一重要结果表明，宇航员在月球上的粒子辐射量大约是地球上的 200 倍。图 5B 显示了 LND 在几个不同月昼期测得的 LET 谱结果^[13]，可见在近两年时间内月球表面 LET 谱非常稳定，这也是因为该时期处于太阳极小期，银河宇宙线的变化相对较小。

1.3 拟展开的实验

从上面的介绍可以看出，月球轨道剂量率和粒子通量的变化与轨道高度、银河射线变化以及太阳活动有关。月球表面的粒子辐射环境与银河射线变化和太阳活动有关。此外，近年来国外对月球粒子辐射环境的探测主要是对月轨辐射剂量以及能谱的测量，并且这些测量绝大部分依赖的航天器所观测的高度都是不低于 50 km 的月球轨道。除了 2019 年发射的“嫦娥 4 号”外没有直接在月球表面观测，虽然“嫦娥 4 号”已经取得了一些重大科学成果，并且将继续获取新的、高精度空间环境数据，但月表粒子实际测量数据仍然不足。

对于未来国际月球科研站，月球表面的粒子辐射环境探测是保障航天员和航天器安全的基础，也是从容应对深空探测空间环境威胁的重要前提。不仅需要对着陆点有更加精确的粒子辐射数据，为载人航天提供风险评估和防护参考，而且突发的大剂量事件（银河宇宙射线中 X 射线、 γ 射线爆等）对太空舱及宇航员的损伤是无法预估的，因此需要对空间辐射 LET 谱进行实时监测，并通过快速响应得到

吸收剂量和剂量当量、有效品质因子等数据。

对于月球和深空的粒子辐射探测技术逐渐趋向于综合化、智能化方向，研制的探测器出现了多粒子、复合化的发展趋势，如前文所介绍的 LRO 的 CRaTER 和 LEND 探测器，以及 CE-4 的 LND 探测器，即一个探测器集成了多种传感器构成望远镜结构，并配备了复杂的电子学读出系统，可实现多粒子种类及 LET 的综合探测。随着先进粒子探测技术的在空间粒子辐射领域的应用，预期探测精度越来越高，粒子能量范围越来越宽，并有更好的空间位置和时间分辨能力；探测器也可以实现体积更小、功耗更低，发展轻小型化多要素综合探测技术。

为了满足未来国际月球科研站的需求，我国亟需进一步加强复合化、智能化粒子辐射探测器的自主研制，掌握相关探测器和电子学系统的设计和研制技术。我国的月球和深空探测虽然起步较晚，但从“嫦娥 1 号”到“嫦娥 5 号”，已经取得了举世瞩目的成就，在空间粒子辐射探测方面积累了宝贵经验和培养了优秀人才。在我国的粒子物理与核物理领域，不少科研单位曾合作参与了众多国内外加速器实验、宇宙线探测等相关的大型科学装置，并做出重要贡献，如参加位于欧洲核子中心的大型强子对撞机上 ATLAS 实验、北京谱仪 BESIII 实验、高海拔宇宙线观测站 LHAASO 等大科学工程，在先进粒子辐射探测领域有深厚的研究基础和技术积累。2015 年，暗物质粒子探测卫星“悟空号”升空，是我国空间天文领域第一颗卫星，是标志着我国粒子辐

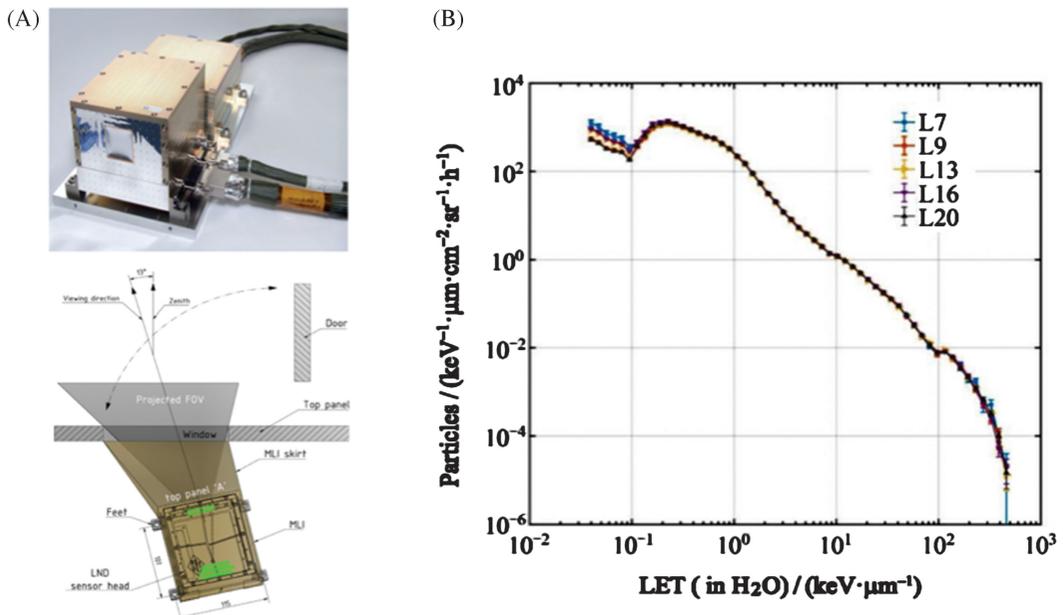


图 5 (A) LND 探测器示意图^[12], (B) LND 探测器测得的不同月昼期的 LET 谱^[13]

射探测迈向太空的里程碑。2017年,我国首颗X射线天文卫星“慧眼”发射升空,是世界上探测能区覆盖范围最广的天文望远镜之一。将这些先进的技术应用到月球粒子辐射探测,将有效地提升我国的月球与深空探测能力,为国际月球科研站的建设做出贡献。

2 在月球上开展新粒子寻找

月球拥有独特的环境,例如高真空度、极弱磁场背景^[14]、低温等,为建造粒子探测装置提供了极佳的实验场所,同时也为搜寻超越标准模型新粒子提供了重大机遇。尽管粒子物理标准模型已经取得了巨大的成功,然而仍旧无法有效解释宇宙学和天文学的一些重要观测事实,包括暗物质、暗能量、正反物质不对称等。2021年美国费米实验室公布缪子4.2倍标准差的反常磁矩偏离结果^[15],更是将研究的注意力吸引到寻找超越标准模型以外的新物理。前沿科学普遍认为存在超越标准模型的新粒子,譬如轴子、大质量弱相互作用粒子、暗光子和磁单极子。这些新粒子一旦被发现,将极大提升人类对物理规律的认识。月球具有得天独厚的实验条件,在月球上搜寻轴子和磁单极子等新粒子具有独特的优势,如利用月球和地球较长的距离,可以建设地月长基线轴子探测网络,为探索超轻质量范围的轴子暗物质空间结构特性提供了研究手段。由于月球没有大气和极弱的背景磁场,磁单极子不会受到大气和磁场作用影响,更容易长期富集在月球上,因此月球环境和古老的月球岩石是寻找磁单极子的全新场所,而以往只能将十分有限的月球岩石运回地球实验室检测。此外,极弱的背景磁场可以有效降低对探测器的磁场屏蔽要求,使得探测器的体积更小和成本更低,便于开展大规模的探测器建设。目前月球新粒子寻找实验还处于一个空白阶段,随着人类航天技术发展,新粒子实验逐渐开启从地面实验到空间实验,再到月球的新时代。

2.1 轴子探测现状

轴子是超出标准模型预言的赝标量基本粒子,是热门暗物质候选粒子,起源于物理学家 Peccei R 和 Quinn H 为了解决量子色动力学中的“强 CP 问题”而提出的 Peccei-Quinn 理论,除此之外轴子还可以解决长期悬而未决的宇宙正反物质不平衡、暗能量和“第五种力”等重大科学问题。在理论模型中,轴子可以与光子、费米子和胶子相互作用,因此催生出多种探测轴子的技术。各个国家纷纷布局了一系

列国家级甚至世界级的实验研究计划,受限于当前的航天技术,轴子搜寻实验都是基于地球上或者空间实验。近期,开展低能区轴子(如 feV-meV)实验搜寻得到广泛关注和研究。低能区的轴子主要表现为波动性,例如 1 feV 轴子的德布罗意波长约为地球周长的 30 倍,远远超过大型对撞机的尺寸,针对低能区的轴子探测通常无法采用传统的高能粒子探测技术。近期,多篇综述文章也特别指出“桌面式”的量子精密测量技术是未来暗物质测量的重大研究前沿^[16, 17]。量子精密测量技术利用原子、分子、光子、自旋等体系的量子关联和纠缠等资源,实现对基本物理量的超灵敏测量。根据下文的介绍,低能区的轴子与这些量子体系发生极弱的耦合作用,等效于在体系上产生一个经典相干波(例如电磁波),从而可以被量子精密技术所测量。量子精密测量技术在仪器体积方面与传统测量技术相比具有突出优势,摆脱传统粒子探测研究对昂贵大型科学装置和极端实验条件的依赖,利用量子精密测量技术则可以实现高精度“桌面式”新粒子及新相互作用直接搜寻。相比大型对撞机,量子精密测量装置具有建造费用低和周期短等优势,因此可以在短时间内搭建多台探测器,实现对长波长的新粒子的阵列式测量,有望在月球上开展新粒子搜寻研究。

2.1.1 基于单台探测器的轴子寻找

理论预测轴子可与电磁场光子发生相互作用,转化为可观测的电磁场光子,其频率对应于轴子的质量。因此,让探测器搜索特定频率的光子可以寻找不同质量的轴子。因为从轴子转化为光子的效率与静磁场强度的平方成正比,这类实验通常需要一个超导强磁体、高 Q 值微波腔以及超低噪声信号放大器。为了提高探测的灵敏度,关键是提高超导磁体的磁场强度以及降低信号放大器的噪声本底。基于以上探测原理,华盛顿大学的 ADMX 实验(The Axion Dark Matter Experiment)利用一个巨大的有内置微波空腔的超导磁体来试图捕捉轴子(如图 6A)^[18],开展了一系列技术研发和轴子实验搜寻研究,特别是利用 NbTi 超导螺线管建造了 8 T 强度的超导磁体,以及用噪声温度更小的 SQUID 放大器(Superconducting QUantum Interference Device)(噪声温度~500 mK)取代了早期使用的 HFET 放大器(Heterojunction Field Effect Transistor)(噪声温度~3 K)。随着 ADMX 装置的不断技术升级,搜寻的轴子质量范围也在不断扩大,从最早期的 1.9~3.65 μeV 逐渐扩大到 8 μeV 。另外,耶鲁大学的

HAYSTAC 研究计划利用 9 T 强度的超导磁体和低噪声的 JPA 放大器 (Josephson Parametric Amplifiers), 该研究计划瞄准更大的轴子质量范围, 能够探测从 $10 \sim 50 \mu\text{eV}$ 质量范围的轴子。与以上研究计划不同, 欧洲核子中心的太阳轴子望远镜 (CAST) 瞄准太阳产生的轴子^[19], 建造了一个长达 9.3 m 以及强度为 9 T 的超导磁体 (如图 6B), 该装置可以自动跟踪对准太阳, 搜寻的轴子质量范围逐渐从 $0.02 \mu\text{eV}$ 扩大到 1 eV 级别。由于使用了体积庞大和笨重的超导磁体, 在月球上开展相关实验具有挑战。

轴子除了和光子相互作用外, 还可能与原子核发生相互作用, 引起原子核的能量变化, 进而在原子核自旋上产生一个等效的振荡磁场。该等效磁场的振荡频率等于轴子的康普顿频率。根据以上理论预言, 研究人员提出利用核磁共振技术来探测轴子, 即将极化的自旋样品放置于静磁场中, 当轴子的康普

顿频率等于或者接近自旋的塞曼分裂频率, 自旋的极化方向将会偏离静磁场方向, 进一步通过探测自旋状态的改变从而实现轴子的直接搜寻。这类实验方案的关键挑战是制备高自旋极化度以及自旋状态高灵敏检测。2014 年, 德国和美国研究组联合提出 CASPEr (Cosmic Axion Spin Precession Experiment) 的轴子搜寻方案 (如图 7A)^[20]。该方案从理论上提出利用核自旋的超极化技术 (例如自旋交换碰撞极化方法), 使得惰性气体氙 (^{129}Xe) 的核自旋极化度达到接近 1, 同时利用超导量子干涉仪磁力计作为核自旋的读出探头。目前 CASPEr 已经公布轴子搜寻的实验初期结果, 但是由于制备的自旋极化度仅有 10^{-6} , 距离预期的理论灵敏度还有差距。由于 CASPEr 方案需要使用超导磁体来扫描轴子的质量, 以及低温 SQUID 磁力计, 在月球上开展相关研究还具有挑战。

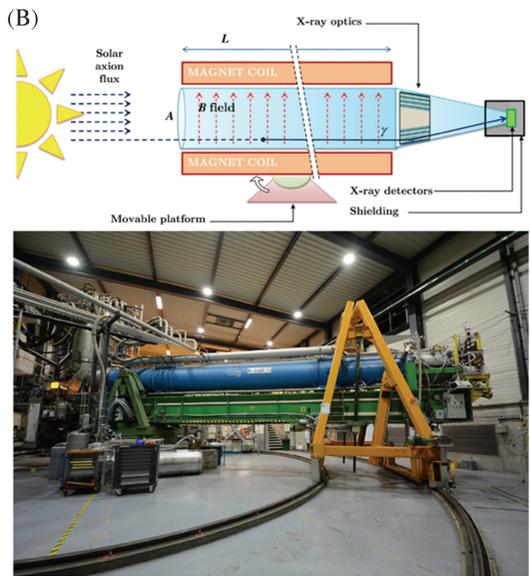
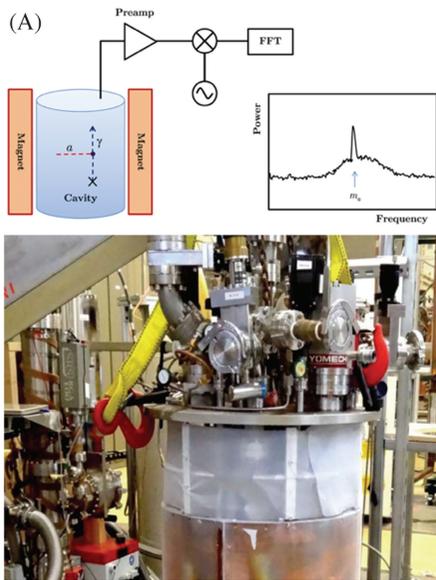


图 6 (A) 华盛顿大学的 ADMX 装置^[18], (B) 欧洲核子中心的太阳轴子望远镜 (CAST)^[19]

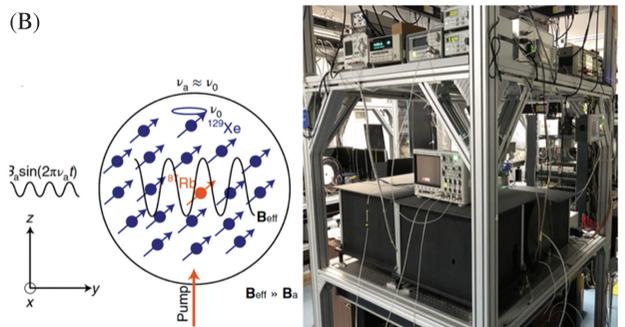
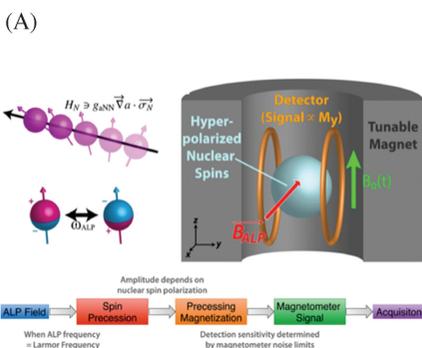


图 7 利用核磁共振技术探测轴子暗物质

(A) CASPEr 研究计划^[20], (B) 基于自旋放大器 (“Spin-based amplifier”) 的轴子搜寻原理及装置^[21-23]

2021 年中国科学技术大学研究组利用惰性气体氙原子和碱金属铷原子混合蒸气室, 开发出超灵敏的核自旋量子测量技术, 实现了迄今为止国际最佳灵敏度的核自旋磁传感器^[21-23]。该工作的核心是发现一种磁场放大现象, 当外界待测振荡磁场的频率接近氙原子的塞曼频率, 待测磁场的强度可以被氙原子显著放大至少 100 倍。相比于 CASPER 方案, 该方案通过铷原子与氙原子的随机自旋交换碰撞, 实现氙原子的自旋信号的费米接触增强读出, 很大程度简化了装置体积和复杂度。基于该物理机制, 他们设计出了第一台磁场量子放大器, 并命名为“自旋放大器”(Spin-based Amplifier)。更进一步, 将自旋放大器与原子磁力计结合, 将原子磁力计的测磁灵敏度显著提高了 128 倍。利用该超灵敏量子技术实现了对质量范围从 10~1 000 feV 的超轻质量暗物质粒子(轴子和暗光子)搜寻, 给出的轴子—原子核实验观测界限比之前国际上最高纪录提升了 5 个数量级^[21], 甚至超越了公认最高的宇宙天文学极限 SN1987A(通过观测大尺度超新星冷却现象而给出的)。因为基于自旋放大器的轴子搜寻实验装置具有体积小、重量轻等优点, 所以有望发射到月球上并用于新粒子寻找实验。

2.1.2 基于阵列探测器的轴子寻找

轴子搜寻实验易受到探测器本身的噪声干扰, 仅用单个探测器很难将轴子信号与噪声源区分开来。如果利用多台探测器同步探测轴子信号, 可以有效将暗物质信号与普通噪声区分开。目前, 国际上已经有原子钟和原子磁力计阵列开展了轴子暗物质搜寻并且给出了轴子与标准模型内粒子相互作用的实验界限。

理论预言轴子可能构成一种拓扑缺陷结构(Topological Defect Dark Matter), 例如构成二维结构的暗物质“墙”(Domain Wall)。2014 年, 研究人员从理论上提出利用 GPS 卫星系统中的原子钟阵列对这类拓扑缺陷暗物质开展搜寻(如图 8A)^[24]。这种拓扑缺陷的轴子暗物质“墙”与原子钟的原子发生相互作用时, 将改变原子精细常数从而改变时钟频率。当这堵暗物质“墙”先后经过不同的 GPS 卫星中原子钟, 使得原子钟阵列出现时间频率先后改变。2017 年, 研究人员报道了相应的实验结果, 尽管没有发现暗物质存在的迹象, 但获得了新的观测约束。以上采用的原子钟为微波波段, 而光学频率段的原子钟也可以搜寻暗物质“墙”, 且具有更高的搜寻灵敏度。2018 年, 有研究组将光频段原子钟用于暗物质探测, 将以往的观测界限进一步提升了两个数量级^[25]。

除了原子钟, 还可以利用超灵敏的原子磁力计构建轴子探测阵列(如图 8B)^[26, 27]。2013 年, 研究人员从理论上提出分布在全球不同位置的原子磁力计可以组成暗物质探测阵列(Global Network of Optical Magnetometers for Exotic, GNOME)^[26, 27], 当轴子暗物质“墙”与原子磁力计中的原子相互作用, 暗物质会在原子自旋上产生一个等效的磁场, 持续时间与轴子组成的拓扑缺陷结构有关, 即与暗物质“墙”的厚度和运动速度直接相关。当轴子暗物质“墙”先后经过不同的原子磁力计时, 原子磁力计会先后感应到一个磁场, 通过这种时间域上的信号关联探测, 可以有效从探测器的干扰噪声中提取出轴子信号。相关实验结果于 2021 年公布, 给出了对拓扑缺陷轴子暗物质的观测约束^[27]。

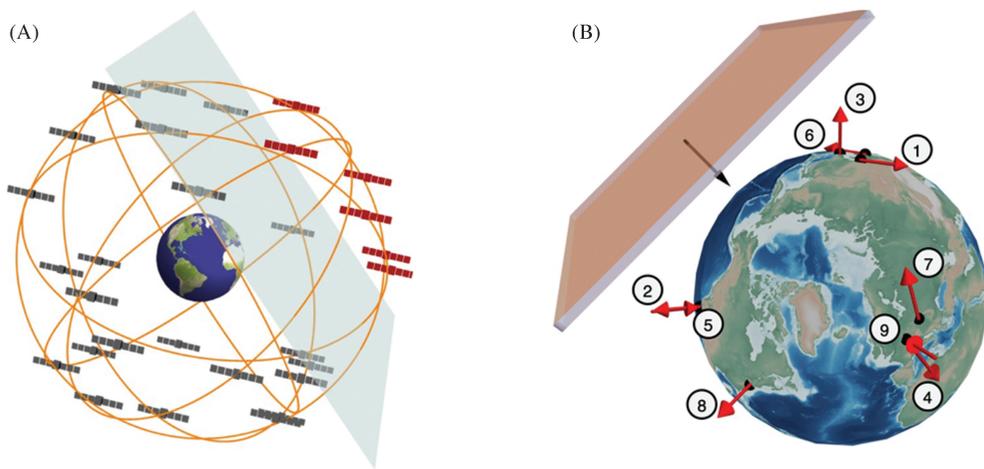


图 8 轴子搜寻网络

(A) 基于 GPS 系统的原子钟搜寻计划^[25], (B) GNOME 研究计划^[27]

2.2 磁单极子探测现状

除了轴子外,理论研究还提出了许多其他的超越标准模型的新粒子,例如磁单极子。1931年,物理学家狄拉克从理论上预言自然界中存在一种只带单一磁极的粒子,称为磁单极子,可以解释为什么我们观测到的所有带电物质的电荷都是量子化的。自此,包括杨振宁等许多著名科学家对其进行了深入研究,磁单极子已经发展为量子力学、凝聚态物理、高能物理等众多领域的重要基本概念,许多前沿理论也预言了磁单极子的存在,比如大统一理论、弦理论和M—理论。如果我们能够在自然界中发现磁单极子,就可以在根本上改变我们对电磁学的理解和为大统一理论和弦理论提供更多的洞见,对物理学的发展有革命性的影响。随着磁单极子的提出,人们提出各种实验方案来寻找这种理论上存在的新粒子。人们首先把寻找的重点放在古老的地球铁矿石和来自地球之外的铁陨石上,磁单极子可能富集在这些古老的岩石中而被长期保存,因此可以通过测量这些岩石的磁通量,从而来判断内部是否存在磁单极子。然而实验结果却令人大失所望。进一步人们将注意力放在月球的古老岩石上,月球上没有大气和极弱的磁场背景,使得磁单极子更加容易在月球岩石中富集。1973年,科学家对“阿波罗”11号、12号和14号飞船运回的月岩进行了检测^[28],使用了SQUID磁力计(如图9A),依旧没有测出任何磁单极子信号。近期,人们利用“自旋冰”(如图9B)^[29]、深地低本底超大型探测器MACRO以及南

极冰立方IceCube等继续搜寻磁单极子。除了捕捉宇宙中的磁单极子,人们尝试利用对撞机产生磁单极子,并设计了一个特殊的磁单极子探测器MoEDAL(如图9C)^[30]。尽管经过大量的努力,目前仍旧没有找到磁单极子,实验给出了磁单极子的通量界限。样品的质量和年龄是提升磁单极子搜寻通量界限的关键参数,但是由于从月球上带回的岩石样品量极为有限以及在月球上取样的范围不够广,未来在月球上建造小型探测器直接开展磁单极子探测实验,将可以极大提升磁单极子的搜寻界限。

2.3 拟开展的新粒子寻找实验

目前在月球上开展新粒子寻找还属于空白领域。由于月球的独特实验条件,我们建议开展轴子和磁单极子的实验搜寻。考虑到航天技术的载荷能力等,先重点发展“小而精”的新粒子探测技术,超灵敏量子传感技术具有灵敏度高、体积小和重量轻的优势,有望成为月球新粒子研究的首批探测手段。原子磁力计作为世界上最灵敏的量子磁传感器,已经实现了小型化甚至是芯片化。另外,月球几乎没有磁场,这为原子磁力计的工作提供了绝佳的干净磁场环境,甚至不需要磁屏蔽系统。因此,我们建议在月球上开展基于原子磁力计的轴子和磁单极子搜寻。在月球上布置多台小型化的原子磁力计,与地球实验室的原子磁力计组成地月轴子长基线探测“望远镜”,通过探测月球和地球探测器之间的关联强度,搜寻超轻质量范围的轴子传播方向,这类轴子的德布罗意波长通常比地球的波长还要大,在地球

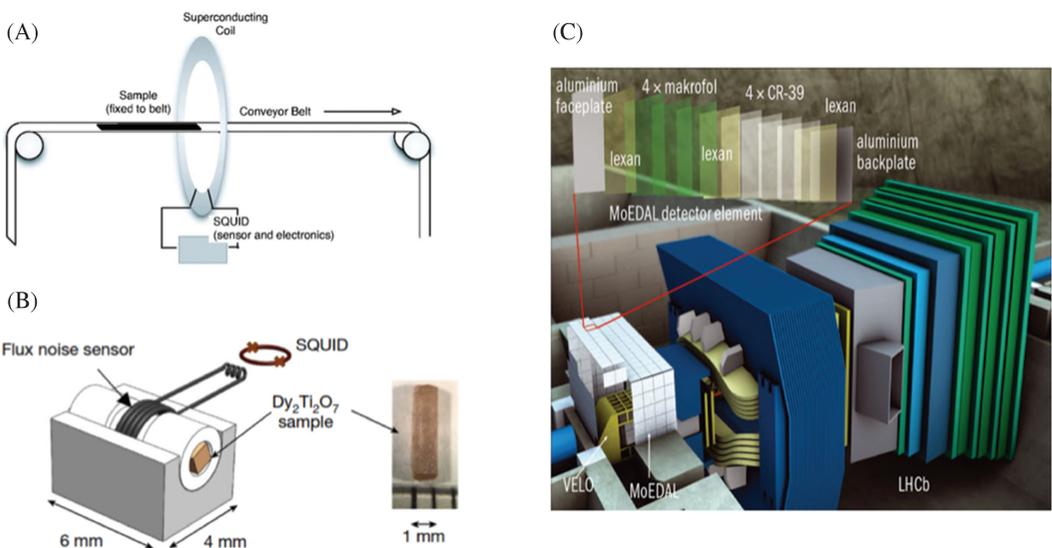


图9 国际上磁单极子搜寻实验

(A) 在古老的岩石中寻找^[28], (B) 在自旋冰中寻找^[29], (C) MoEDAL 搜寻装置^[30]

上难以实现其传播方向的探测。该“望远镜”还可以探测拓扑缺陷轴子暗物质,通过月球和地球探测器轴子信号的时间延迟,了解轴子拓扑缺陷结构信息。除了寻找轴子,原子磁力计还可以用于寻找月球环境中的磁单极子。月球没有大气和磁场,是寻找磁单极子的好场所。原子磁力计与感应线圈结合,通过测量磁单极子通过感应线圈而诱导出的感应信号,以此寻找磁单极子信号。更进一步,在月球上建造感应线圈阵列来提高磁单极子搜寻灵敏度。磁单极子可能会富集在古老的月球岩石,小型化的原子磁力计为月球岩石实地测量提供了可能性,无需携带返回地面实验室测量。

在月球上开展新粒子寻找还需要大量前期工作积累。随着中国空间站的即将建成,我们建议先开展空间站量子传感技术和新粒子探测研究,为未来月球新粒子实验奠定基础、积累经验和培养优秀的科学家团队。值得注意的是,除了新粒子探测,量子传感技术在其他方面也具有重要科学价值,例如超灵敏原子磁力计可提供一种高灵敏且大尺度的地磁观测技术,为系统认识地球内部结构、勘探地球资源、磁暴监测、地震地磁场异常监测等国家重大战略需求提供重要研究手段。

3 总 结

月球的初期探索已经展现出了月球在科学研究方面的巨大潜力,将为研究基本粒子物理、天体和宇宙学以及寻找新粒子提供重大机遇。随着各国空间站和月球探索技术的快速发展,月球粒子物理研究将展开一场激烈的竞争。中国和俄罗斯联合发起的国际月球科研站项目,为月球上开展宇宙粒子辐射探测和轴子等新粒子搜寻提供了机会,应尽早布局相关方面的理论和技术研究。

参 考 文 献

- [1] Simpson JA. Elemental and isotopic composition of the galactic cosmic rays. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 1983, 33: 323—382.
- [2] Potgieter MS. Solar modulation of cosmic rays. *Living Reviews in Solar Physics*, 2013, 10(1): 3.
- [3] 赵磊, 尚钰轩, 袁爽, 等. 载人深空探索中空间辐射防护技术的研究进展. *科学通报*, 2019, 64(20): 2087—2103.
- [4] 冯彦君, 华更新, 刘淑芬. 航天电子抗辐射研究综述. *宇航学报*, 2007, 28(5): 1071—1080.
- [5] Dachev TP, Tomov BT, Matviichuk YN, et al. An overview of RADOM results for earth and moon radiation environment on Chandrayaan-1 satellite. *Advances in Space Research*, 2011, 48(5): 779—791.
- [6] Spence HE, Case AW, Golightly MJ, et al. CRaTER: the cosmic ray telescope for the effects of Radiation experiment on the lunar reconnaissance orbiter mission. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1/2/3/4): 243—284.
- [7] Mitrofanov IG, Bartels A, Bobrovniksky YI, et al. Lunar exploration neutron detector for the NASA lunar reconnaissance orbiter. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1/2/3/4): 183—207.
- [8] Zeitlin C, Schwadron NA, Spence HE, et al. Update on galactic cosmic ray integral flux measurements in lunar orbit with CRaTER. *Space Weather*, 2019, 17(7): 1011—1017.
- [9] Spence HE, Golightly MJ, Joyce CJ, et al. Relative contributions of galactic cosmic rays and lunar proton “albedo” to dose and dose rates near the Moon. *Space Weather*, 2013, 11(11): 643—650.
- [10] Litvak ML, Mitrofanov IG, Sanin AB, et al. The variations of neutron component of lunar radiation background from LEND/LRO observations. *Planetary and Space Science*, 2016, 122: 53—65.
- [11] 王馨悦, 张爱兵, 荆涛, 等. 近月空间带电粒子环境——“嫦娥1号”“嫦娥2号”观测结果. *深空探测学报*, 2019, 6(2): 119—126.
- [12] Wimmer-Schweingruber RF, Yu J, Böttcher SI, et al. The lunar lander neutron and dosimetry (LND) experiment on Chang'E 4. *Space Science Reviews*, 2020, 216(6): 1—40.
- [13] 张坤毅, 薛长斌, 侯东辉, 等. LND 两年月表辐射剂量测量结果. *空间科学学报*, 2021, 41(3): 439—444.
- [14] Wiczorek MA, Weiss BP, Breuer D, et al. Lunar magnetism. [2022-02-25]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03524536>.
- [15] Arcadi G, Calibbi L, Fedele M, et al. Muon g-2 and B anomalies from dark matter. *Physical Review Letters*, 2021, 127(6): 061802.
- [16] Safronova MS, Budker D, DeMille D, et al. Search for new physics with atoms and molecules. *Reviews of Modern Physics*, 2018, 90(2): 025008.
- [17] DeMille D, Doyle JM, Sushkov AO. Probing the frontiers of particle physics with tabletop-scale experiments. *Science*, 2017, 357(6355): 990—994.
- [18] Du N, Force N, Khatiwada R, et al. Search for invisible *Axion* dark matter with the *Axion* dark matter experiment. *Physical Review Letters*, 2018, 120(15): 151301.

- [19] Anastassopoulos V, Aune S, Barth K, et al. New CAST limit on the *Axion*-photon interaction. *Nature Physics*, 2017, 13(6): 584—590.
- [20] Budker D, Graham PW, Ledbetter M, et al. Proposal for a cosmic *Axion* spin precession experiment (CASPER). *Physical Review X*, 2014, 4(2): 021030.
- [21] Jiang M, Su HW, Garcon A, et al. Search for *Axion*-like dark matter with spin-based amplifiers. *Nature Physics*, 2021, 17(12): 1402—1407.
- [22] Su H, Wang Y, Jiang M, et al. Search for exotic spin-dependent interactions with a spin-based amplifier. *Sci Adv*, 2021, 7(47): eabi9535.
- [23] Jiang M, Su HW, Wu Z, et al. Floquet maser. *Science Advances*, 2021, 7(8): eabe0719.
- [24] Derevianko A, Pospelov M. Hunting for topological dark matter with atomic clocks. *Nature Physics*, 2014, 10(12): 933—936.
- [25] Roberts BM, Blewitt G, Dailey C, et al. Search for domain wall dark matter with atomic clocks on board global positioning system satellites. *Nature Communications*, 2017, 8: 1195.
- [26] Pospelov M, Pustelny S, Ledbetter MP, et al. Detecting domain walls of axionlike models using terrestrial experiments. *Physical Review Letters*, 2013, 110(2): 021803.
- [27] Afach S, Buchler BC, Budker D, et al. Search for topological defect dark matter with a global network of optical magnetometers. *Nature Physics*, 2021, 17(12): 1396—1401.
- [28] Alvarez LW, Eberhard PH, Ross RR, et al. Search for magnetic monopoles in the lunar sample. *Science*, 1970, 167(3918): 701—703.
- [29] Dusad R, Kirschner FKK, Hoke JC, et al. Magnetic monopole noise. *Nature*, 571(7764): 234—239.

Measurements of Particles and Radiations and Searches for New Particles in Deep Space

Min Jiang^{1,2†} Lailin Xu^{1,3†} Zhengguo Zhao^{1,3*}

1. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

2. CAS Key Laboratory of Microscale Magnetic Resonance, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

3. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract As lunar exploration advances to a new era in recent years, the moon shows great potential for scientific research, and its unique environment will provide great opportunities to study fundamental particle physics, cosmology and search for new particles. Particles and radiations in deep space inherits invaluable information on the origin and evolution of astronomical objects and the universe. Detection of particles and radiations in the outer space provides an important and unique experimental approach in the field of astrophysics and cosmology. The special lunar environment also offers a new portal to search for new particles beyond the Standard Model of the particle physics, such as axions and magnetic monopole particles. This article is aimed to briefly review the current status and future prospects of the detection of particles and radiation on the moon, as well as lunar based searches for axions and magnetic monopoles.

Keywords deep-space exploration; space radiations; beyond the standard model; axion; magnetic monopole; quantum sensing

(责任编辑 刘敏 姜钧译)

† The authors contributed equally to this paper.

* Corresponding Author. Email: zhaozg@ustc.edu.cn