

空间中性原子成像应用及发展

杨垂柏,王月,路立,孔令高,张斌全,荆涛
(中国科学院国家空间科学研究中心,北京 100190)

摘要:本文回顾并分析了空间中性原子成像的科学意义、观测原理及其应用、技术发展历程、发展趋势等。中性原子成像发展经历了三个不同阶段,其应用能力和认可度不断提升,直至为其发射专门卫星开展观测。空间科学研究对空间中性原子成像提出了宽能域、时空高分辨的需求,并刺激了超薄死层 Si-PIN 传感器应用和光学调制技术引入发展,为将来空间天气监测等业务化应用发展奠定理论和技术基础。

关键词:空间中性原子;成像技术;成像应用;发展趋势

中图分类号: V520.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2015)03-0125-07

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2015.03.001

AN OVERVIEW OF SPACE ENA IMAGING METHODOLOGY AND APPLICATION

YANG Chui-bai, WANG Yue, LU Li, KONG Ling-gao, ZHANG Bin-quan, JING Tao
(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Space ENA imaging can provide global or remote view of ions distribution and variation, which is the advantages compared to in situ measurement, and it has been more and more taken as an important space measurement method in missions. There were 3 phases of space ENA imaging developing. The methodologies and technologies of space ENA imaging were overviewed and analyzed, some requirements and trends of ENA measurements were proposed.

Key words: space ENA; imaging technology; imaging application; trend

0 引言

对于空间的各类扰动或者爆发的了解方法的重要手段是对其中粒子的物理参数进行测量,为此研发了大量的仪器搭载在卫星进行观测。依据仪器探测粒子所在区域可以分为就位探测和遥感探测,其中如风云气象卫星所搭载空间粒子探测器^[1-3],由于其测量粒子反映的是仪器所在区域空间活动,就被称之为就位探测;而另外一类探测方法则是利用仪器观测粒子物理量间接为反演另外空间活动区域,也就被称之为遥感探测,诸如国内双星探测的中性原子成像仪^[4-5],遥感探测可以利用空间中性原子或者空间 X 射线^[4-6]。

遥感探测通常需要将观测到物理量数据组合成图开展研究,因而此类探测方法也被称之为成像。

空间中性原子是由于空间离子在爆发过程中与中性背景粒子相互作用进行电荷交换后形成的成分,其不带电荷,不受空间存在的电场和磁场成分约束,可以在携带有空间离子信息的状态下沿直线飞离电荷交换发生区域。由于中性原子的带“状态”直线飞行特性,也就可以利用仪器遥远测量中性原子物理量,从而获得发生电荷交换前的空间离子特性。通过对遥远区域的持续观测,从而实现对空间等离子体活动过程的整体成像^[4-5]。

1 空间中性原子观测的科学意义

空间环境科学研究进展表明空间天气变化,无论是磁层亚暴和磁暴还是太阳耀斑爆发等天气变化活动,以及太阳风等与包括地球在内的行星相互作用,均可造成全尺度演化特征^[4-5]。卫星如果采用

收稿日期: 2015-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41404149)

作者简介: 杨垂柏(1981-),男,江西省人,博士研究生,研究方向:空间辐射环境及其效应探测研究。

E-mail: ycb@nssc.ac.cn

就位探测获取的数据只反映所经过区域粒子物理特性,且同时夹杂有空间变化和时间变化因素的“噪声”在内,不足以或无法满足空间等离子体全球或遥远区域的时、空演化物理变化特征研究的需求。

空间中性质原子的空间分布和通量变化与地磁活动、太阳活动以及行星形态特性等密切相关,中性原子成像可以获取等离子体空间分布和时间演化等过程信息,可以满足磁暴期间对全球等离子体背景演化过程、太阳爆发及与行星作用过程区域的研究。对不同区域中性原子开展成像观测可以获得多方面科学意义^[16-20]。

针对地球空间中性质原子的观测可以提供环电流等多种信息,诸如:全球不对称性、能量粒子漂移和注入。当然具体典型物理问题诸如:磁暴主相期间环电流演化过程;环电流衰减过程;磁暴期间环电流精细结构;等离子体层、环电流和辐射带相互耦合;极端行星际条件下的磁层电离层耦合对环电动力学过程的影响等。从而为亚暴和磁暴产生机制等研究提供新的窗口,甚至获取磁重联发生过程的系统图像。

日冕中性原子成像及其能谱分析直接获取太阳能量质子(SEP)事件期间的粒子加速。中性原子可以作为对高日冕区域能量离子的遥感窗口,在高日冕区域被相信是太阳能量质子被快速日冕物质抛射驱动激波进行加速。具体问题诸如:SEP在什么地方被快速CME驱动激波进行加速;在激波前表面;或者是在湍流度增强的激波之后等等。

日球层与行星际物质的相互作用,特别是了解超热粒子产生;日球层与行星际物质相互作用如何产生超热粒子;粒子在何处被加速;什么条件会导致粒子加速发生;被加速成的超热粒子与异常宇宙线源区是否相关等问题。

2 中性原子探测的基本原理

空间中性质原子探测为基于传统粒子质谱探测原理,增加去污染部件等主要部分构成探测单元,并且将探测单元组合后对空间区域进行成像。空间中性质原子探测由离子光学调理、离子能量确认以及污染去除三个主要过程,如图1为单成像单元示意图。

2.1 离子光学调理

空间粒子通过离子光学系统通道实现对中性原子提取和视场确定等,被称之为离子光学调理,通常离子光学系统与去污染部分的部件是共用的。离子光学调理包括电场偏转、中性粒子电离及粒子通道

飞行三个主要具体过程。

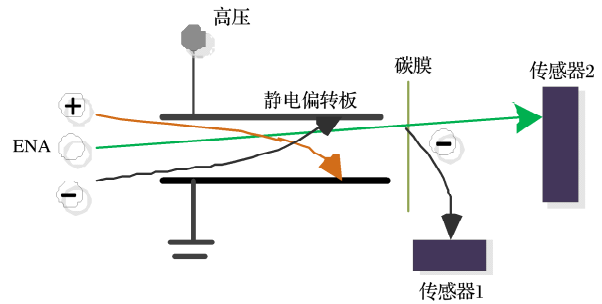


图1 空间中性质原子探测原理

1) 静电电场偏转

中性原子探测仪器采用的传感器对带电粒子敏感,中性原子探测需要去除带电粒子的影响和干扰。去除带电粒子的方法可以采用电场或磁场偏转,但磁场偏转效果不如电场,因而采用静电场进行偏转。

静电场设计是仪器的重要参数,静电场决定了有效去除带电粒子的能量,同时偏转系统还承担仪器的准直、设置角分辨和仪器的几何因子确定等作用。通常采用平行板静电场,偏转的带电粒子截止能量与参数关系:

$$E_{cut} = qV(l + (\frac{l}{4d})^2) \quad (1)$$

q 是带电粒子的电荷数, V 为静电场电压, l 为平行板电场的长度, d 为平行板距离。提高带电粒子的截止能量,可通过提高 V 、增加 l 、减小 d 实现。

在 V 和 d 的设计中,需要考虑真空中高压放电,同时 l 和 d 的设计也决定了仪器的几何因子, l 增大、减小 d 以减小几何因子。

2) 中性原子电离

经过了静电偏转部分对于中性原子的提取,需要先剥离电子,将中性原子转换为离子。可以采用两种方式,薄膜剥离和表面剥离。薄膜剥离是粒子通过薄膜时,变成阳性、阴性或者中性。表面剥离一般应用于能量非常低的情况(100~300eV)。粒子在物质表面发生反射,反射粒子可能是正离子或者是负离子,粒子电离后电荷态取决于表面材料、中性原子特性和能量。电离效率依靠靶材料、入射角和粒子能量等。电离方式需要根据具体科学需求的具体能量范围来进行设计,从而尽可能使的剥离效率达到最佳。

3) 粒子通道飞行

测量粒子在固定飞行通道距离内飞行时间获得粒子速度是探测粒子质谱的重要一环,获取飞行时

间是通过飞行距离起始处的起始信号和终止处的终止信号之间的时间差给出。通过测量粒子的速度,进而给出粒子的能量等信息,粒子通道飞行的测量方法被称之为“飞行时间(TOF)方法”。

2.2 粒子能量测量

ENA 成像的像素传感器与带电粒子探测所采用的传感器需求一致,典型类型包括通道电子倍增器(CEM)、微通道板(MCP)和硅半导体(SSD)等种类传感器。

CEM 是覆盖多次膜的玻璃管,工作时在 CEM 两端加载电压。当粒子进入 CEM,与内壁多次碰撞产生大量二次电子,粒子信号通过这种方式被放大 $10^6 \sim 10^8$ 。收集二次电子信号,从而获取入射粒子的计数。采用弯曲形态的 CEM 可以避免离子反馈效应。

MCP 的工作原理类似于大量 CEM 阵列组合形成一个平板,每个通道即实现一个 CEM 功能。通常 MCP 都是两个或者三个一起使用,防止离子反馈效应。为提高增益,两个板间距离要尽可能的小,使第一个 MCP 中释放的电子云可迅速的覆盖第二个 MCP。2 个 MCP 组成 V 型,一般可实现 $10^6 \sim 10^7$ 的放大增益,放大增益同时受到微孔直径约束。

SSD 是空间带电粒子探测的另一类典型传感器。当粒子进入到半导体材料中,产生电子-空穴对,在传感器偏压电场的作用下,收集电子-空穴形成脉冲信号,脉冲高度正比于粒子的沉积能量,与 TOF 等方法配合实现粒子成分和能量的区分。由于 SSD 生产工艺会在传感器表面形成死层,其厚度决定了能够探测粒子低端能量,只有能够穿透死层并在灵敏层中沉积能量的粒子才能被有效感知。当前商业硅探测器死层厚度最薄为几十 nm,从而导致硅传感器可以探测的粒子能量为几十 KeV 以上。

2.3 UV 污染去除

在空间粒子探测中,紫外光污染是仪器设计需要考虑的重要环节。采用半导体传感器探测粒子,一般选用挡光层抑制光污染,厚度至少为 150~200 nm。MCP 探测器对 UV 光也敏感,MCP 对 30~60 nm EUV 的效率约为 10%,随着波长的增加,响应效率呈现对数衰减。

抑制 UV 污染的方式主要分为 3 种:对于能量 >20 keV 的 ENA 粒子采用金属箔,对于能量范围为 1~50 keV 的 ENA 粒子采用极薄的箔,对于能量为 10~1000 keV 的 ENA 粒子采用光栅。采用薄膜的方式可以将 ENA 粒子转换为带电粒子同时提供了

UV 保护。

当然由于挡光层对于 UV 的阻挡是通过降低光通量方式实现,挡光层在吸收光能量的同时,也是会吸收粒子的能量,从而影响传感器可以测量的粒子能量低端。因此,对于挡光层设计需要权衡挡光效率和仪器测量能量低端需求。

2.4 中性原子成像方法

中性原子成像方法可以借助仪器载台运动利用单成像单元对观测目标进行成像,采用组合成像单元对观测目标进行成像,如图 2(a)、(b)所示。其中(a)为利用单准直器配合单成像单元的单元像素成像测量,(b)为利用百叶窗进行空间分隔的组合成像方法。

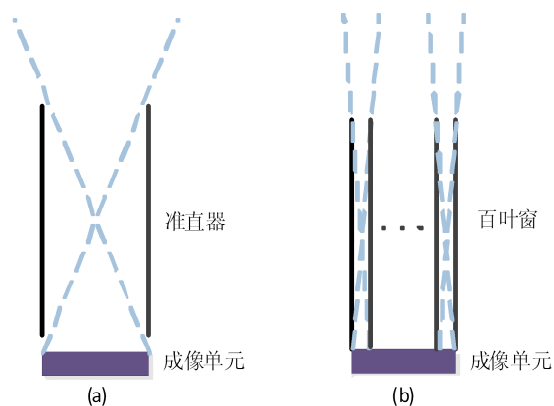


图2 两类不同的成像方式

仪器成像方法借助载台单点成像单元进行扫描完成成像,诸如早期的 CRRES 卫星及 IBEX 卫星等,通常这类成像的空间分辨率不高,而时间分辨率较低;另外可以采用一维传感器阵列而借助卫星自转进行另外一维扫描而成像,诸如国内的双星计划 TC-2 卫星^[5];其他目前正在开发二维直接扫描成像的方式,诸如 KuaFu 计划太阳日冕中性原子成像,这类成像通常针对三轴稳定卫星平台。

3 空间中性质原子观测应用发展

自从 ISEE-1 卫星开展了在轨中性原子观测实验以来,IMP7/8、Geotail、CRRES、Astrid、IMAGE、IBEX 以及国内 DSP/TC-2 在内等多颗卫星开展了地球空间、太阳日冕及日球层边界等区域的中性原子观测。早期中性原子探测借助于带电粒子探测仪器部分视场开展观测,后来又开发了专门的中性原子观测类仪器。不断获得大量的科学数据,推动相关理论和技术研究的发展^[4-5]。在开展了一段时间中性原子观测以后,随着对中性原子观测的优势和特

色被认识,人们便开始了研制专门 ENA 观测仪器^[5-9]。

上世纪90年代初期,专用 ENA 观测仪器 PIPPI 被研制了出来,安装在微小卫星 ASTRID 上,并于1995年1月发射。仪器由半导体传感器探测模块和微通道板传感器探测模块两个主要部分构成,从而实现亚 keV 到 keV 量级中性原子的探测。

其后,美国在 IMAGE 卫星上配置了三台专门 ENA 观测的成像仪,三台成像仪的测量范围各有侧重、甚至重叠,仪器于2000年3月发射开展观测。仪器测量能谱进一步的有了拓宽,测量空间分辨率也进行了提高。仪器在轨正常工作了5年多,获取了大量的数据图像资料。在这首次专用空间中性原子成像仪飞行成功以后,IMAGE 卫星项目组陆续在其网站上发布了20多项由于中性原子观测数据而研究获得的全新重大发现,震撼了空间科学界^[6-12]。

我国双星计划 TC-2 卫星搭载了中性原子成像仪并于2004年顺利发射,仪器开机观测后成功传回大量 ENA 图像数据。尤其是 TC-2 在轨运行期间经历了多次大的太阳暴发事件,在此期间 NUADU 在北极远轨道上空拍摄到边缘清晰的 ENA 暴发的源区分布结构和全球空间分布特征,以及带电粒子分布特性。与 IMAGE 卫星的 HENA 相比,NUADU 探测器几何因子更大,具有更高的时间分辨特性,从而成功实现记录下中性原子暴的演化过程。和 IMAGE 配合实现了对地球空间粒子暴事件的多视点成像探测和对环电流活动的立体监测^[12-19]。

随着中性原子观测技术和数据利用方法不断发展,中性原子观测仪器已经深入各个太空区域。美国在 TWINS 卫星、STEREO 卫星等搭载了中性原子观测仪器,用于研究地球磁暴及日冕物质爆发等现象;并且发射专星 IBEX 开展对日球层边界的三维观测,观测结果改写了人类对于日球层形态的认识^[21]。国内也正在空间科学专项的支持下开展空间中性原子观测研究,研制 MIT 计划的磁层卫星中性原子成像仪 (NAIS) 和 Kuafu 计划的日冕中性原子成像仪。NAIS 将用于观测地球磁层内部区域的中性原子,从而开展地球磁层内部在磁暴、亚暴等时期的各类离子加速、扩散等机理机制研究。

4 空间中性原子成像观测发展趋势

随着空间粒子爆发等现象研究深入,以及空间中性原子成像的特色和能力不断体现,空间中性原子成像探测应用在不断拓展,包括:测量能量范围的拓宽、分辨率的提升、调制成像方法引入及业务化应用的推进。

4.1 ENA 探测能量范围拓宽

中性原子成像的应用区域和能段也在不断拓宽,由早期应用于地球空间,已经拓展到了行星际空间、其他星球等。不同区域由于其中性原子的形成过程有所不同,中性原子在空间不同区域的能谱也不尽相同。中性原子能量范围覆盖了从 10 eV 到 MeV 的宽能谱范围,不同来源的 ENA 能量范围分布见图。

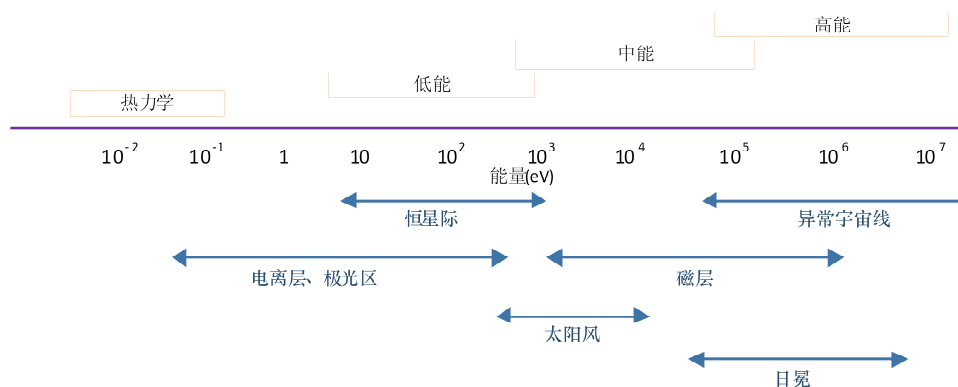


图3 空间 ENA 的能量分布

针对具体不同的研究对象和目标,探测能量范围不同则采用的探测技术手段也不同。其中 ENA 能量的核心探测手段主要是采用 MCP 和 SSD 两类

传感器,其中 MCP 的探测能量范围从几十 eV 至几十 keV,SSD 的探测能量范围从几十 keV 至几百 keV。随着低噪声的 SSD 应用,使其探测能量下限

达到几个 keV。

高能 ENA 能量上限将提升,能量上限将达到 MeV 量级以上,覆盖太阳日冕爆发等离子探测的需求;低能 ENA 探测下限的提升,能量低于 1 keV 的 ENA 探测基于表面粒子电离探测技术,水星由于其磁场较弱的特点,未来对水星 ENA 探测需要实现超热离子至几个 keV 的探测。对于行星飞离磁层的中性原子的探测,将为磁层水等物质流失的机制、规律的研究提供数据支持,从而了解类似现象在地球磁层。

4.2 测量时间、空间分辨率不断提高

随着卫星平台对地通信能力的不断提高,更高的空间科学探测数据传输到地面成为可能,而这种能力的提升进而刺激了科学研究对空间粒子探测的

时空分辨率的更高需求。空间中性原子探测的分辨率提高,将可能为空间科学研究提供更丰富的信息,诸如磁层内环电流区域的许多快速变化需要有秒量级的成像能力,甚至更快。

采用不同成像方法很大程度将影响观测的空间和时间分辨率,诸如借助卫星自转而实现二维扫描的会比直接二维成像的时间分辨率要差,并且由于空间粒子探测的统计涨落问题也将进一步降低时间分辨率。随着光学调制成像方法的引入,未来获得更精细的空间分辨,仪器的探测视场分辨率不断提升,甚至可以达到 $1'' \times 1''$ 的空间分辨。如表 1 所示,为国内外 5 个典型计划卫星仪器的时空分辨率的比较。成像的时间分辨率不断提高,空间分辨率成量级提高。

表 1 典型的卫星/仪器的时、空分辨率

	IMAGE/HENA	TC-2/NUADU	IBEX/Hi	MIT/NAIS	KuaFu/ SENAI
时间分辨率	2s	4s	2day	4s	1s
空间分辨率	$8^\circ \times 12^\circ$	$11.5^\circ \times 2.5^\circ$	$6.5^\circ \times 6.5^\circ$	$6.5^\circ \times 2.5^\circ$	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$

4.3 光学调制在中性原子成像的应用

空间中性原子成像的方式如上节所述包括三大类,其中单点传感器扫描成像的方式最浪费粒子,毕竟中性原子相对于带电粒子而言是稀少的,如果能够尽可能多的对其探测到将可以获得空间波动变化的更多信息。而对于二维扫描成像方法而言,在实现方面也存在着直接百叶窗隔离方式和粒子光学调制方式两大类,百叶窗式也即直接将空间隔离成不同的视场而每个传感器单元只负责独立视场,而粒

子光学调制方式采用特定栅网组合而所有传感器都观测整个视场内的所有中性原子。粒子光学调制方式借鉴了目前普通光学调制方法,中性原子的调制成像也可以采用编码调制、傅立叶调制及旋转调制。不同的调制成像方法适合于不同的卫星平台,不同的调制方式结构复杂性也不同,将导致研制成本不同,当然也可以获得不同的时间、空间分辨率,具体如表 2 所示。

表 2 不同成像方式的时、空分辨率等比较

	单传感器	百叶窗	编码调制	傅立叶调制	旋转调制
时间分辨率	低	较低	较高	较高	高
空间分辨率	低	较高	较高	高	较高
适合平台	自旋稳定	自旋/三轴稳定	自旋/三轴稳定	自旋/三轴稳定	自旋稳定
结构复杂性	简洁	较简洁	较复杂	复杂	较复杂

目前国内正在研制的 MIT 空间探测计划磁层卫星上装载的 NAIS 采用的成像方式就是百叶窗式,通过百叶窗隔离 30 个独立传感器,这组传感器组成一维的成像单元,随着卫星的自旋而实现二维扫描成像。KuaFu 计划的对日观测卫星将位于 L1 点开展对

太阳观测,将来其上装载的 SENAI 由于三轴稳定卫星将直接采用二维编码调制成像方式直接对太阳日冕中性原子进行观测。

4.4 由科学研究服务向业务应用拓展

空间中性原子成像观测对科学研究的作用贡献

已经被人们所认识,随着空间环境和空间天气的概念不断深入人心,利用中性原子成像在遥感、大尺度观测等方面的特点,作为空间环境监测业务化手段之一,为空间环境和空间天气预警预报工作服务也是趋势。

日地之间的物质扩散、加速等都可能造成中性原子爆发,在获得此间中性原子爆发与地球磁层响应规律之后,便可以利用此类监测开展业务预报。通过对磁尾中性片区域中性原子爆发进行监测,并最终获得其爆发规律与地球磁暴、亚暴之间规律特性,便可通过中性原子监测从而为空间天气研究、预报服务。

5 小结

随着空间粒子探测技术不断发展,以及观测需求不断演进,空间中性原子成像方法也在不断深化发展。粒子光学调制的引入、超薄死层 Si - PIN 传感器等应用,成像的空间分辨率、时间分辨率在不断提高,粒子能量不断提高,观测区域也在不断拓展,使得这种观测手段的应用能力不断增强。

空间中性原子成像可以为空间科学研究给出其他就位粒子测量所无法给出的短时间内全球或遥远区域粒子分布和变化图景,为开展空间爆发等类型活动机理、机制和模式研究、甚至将来为空间天气预警预报提供业务化应用的有效手段。

参考文献:

- [1] 王世金. FY - 1C/D 极轨气象卫星空间粒子成分监测器及其在轨探测结果[J]. 上海航天, 2004, 21(4): 23 - 28.
- [2] 韦飞, 王世金, 梁金宝, 等. 风云二号 03 批卫星空间环境监测器[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 1 - 11.
- [3] 肖佐, 邹积清, 邹鸿, 等. "资源一号" 卫星星内高能粒子探测器[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39(3): 361 - 369.
- [4] Susan ML, Jan B, Igor S, et al. The energetic Neutral Atom Detector Unit (NUADU) for China's Double Star Mission and its calibration [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, section A, 2004, 530(3): 311 - 322.
- [5] 沈超, 刘振兴. 环电流区中性原子观测特性模拟研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 1 - 10.
- [6] Branduardi - Raymond G, Sembay S F, Eastwood J P, et al. AXIOM: Advanced X - ray Imaging of the Magnetosphere [J]. Experimental Astronomy, 2012, 33(2 - 3): 403 - 443.
- [7] Daniel C C. The Simultaneous perturbation method for processing magnetospheric images [C]. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Intelligent Control, ISIC, Gaithersburg, MD, USA, 1998, IEEE International Symposium on Intelligent Control - Proceedings 1998: 616 - 621.
- [8] Michael A G. A new collimator design for energetic neutral atom instruments [J]. Review of Scientific Instruments, 1994, 65(3).
- [9] Henderson M G, Thomsen M F, Skoug R, et al. Calculation of IMAGE/MENA geometric factors and conversion of image units of integral and differential flux [J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(4): 1 - 24.
- [10] Mitchell D G, Jaskulek S E, Schlemm C E, et al. High energy neutral atom (HENA) imager for the IMAGE mission [J]. Space Science Reviews, 2000, 91(1 - 2): 67 - 112.
- [11] Mike G, Edmond C R, Donald GM, et al. Energetic neutral atom imaging of the heliospheric boundary region [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (A8): 15767 - 15781.
- [12] Mewaldt R A, Leske R A, Shih A Y, et al. Observations and Interpretations of Energetic Neutral Hydrogen Atoms from the December 5, 2006 Solar Event [C]. AIP Conference Proceedings 1216, 2010, Twelfth international Solar Wind Conference.
- [13] McKenna - Lawlor S, Lu L, Barabash S, et al. The NUADU experiment on TC - 2 and the first Energetic Neutral Atom (ENA) images recorded by this instrument [J]. Annales Geophysicae, 2005, 23(8): 2825 - 2849.
- [14] Lu L, McKenna - Lawlor S, Barabash S, et al. Iterative inversion of global magnetospheric ion distributions using energetic neutral atom (ENA) images recorded by the NUADU/TC2 instrument [J]. Annales Geophysicae, 2008, 26(6): 1641 - 1652.
- [15] Brandt PC, Demajistre R, Roelof EC, et al. IMAGE/high - energy energetic neutral atom; Global energetic neutral atom imaging of the plasma sheet and ring current during substorms [J]. Journal of Geophysical Research. A. Space Physics, 2002, 107(A12): SMP 21 - 1 to SMP 21 - 13.
- [16] Perez J D, Fok M - C, Moore T E. Deconvolution of energetic neutral atom images of the earth's magnetosphere [J]. Space Science Reviews, 2000, 91(1 - 2): 421 - 436.
- [17] Paul H S, Bewtra N K. Charge exchange lifetimes for ring current ions [J]. Space Science Reviews, 1987, 22(3): 301 - 318.
- [18] Mura A, Orsini S, Milillo A, et al. ENA detection in the dayside of Mars: ASPERA - 3 NPD statistical study [J]. Planetary and Space Science, 2008, 56(6): 840 - 845.
- [19] Ip W - H. ENA diagnostics of auroral activity at Mars [J]. Planetary and Space Science, 2012, 63 - 64: 83 - 86.

(下接第 138 页)

- diamond plate liftoff achieved by ion implantation and subsequent annealing[J]. *Applied Physics Letter*, 1992, 61(26): 3124 – 3126.
- [38] Hideaki Y, Akiyoshi C, Yoshiaki M, et al. Developments of elemental technologies to produce inch – size single – crystal diamond wafers [J]. *Diamond & Related Materials*, 2011, 20(4): 616 – 619.
- [39] Bundy F P, Hall H T, Strong H M, et al. Man – Made Diamonds[J]. *Nature*, 1955, 176: 51.
- [40] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一凡, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(15): 161 – 177.
- [41] Li Liuan, Li Hongdong, Lü Xianyi, et al. Dependence of re-
 ~~~~~  
 (上接第 130 页)
- [20] Lukyanov A, Barabash S, Holmstrom M. Energetic neutral atom imaging at Mercury [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(11): 1890 – 1898.
- [21] Rodriguez MD F, Saul L, Wurz P, et al. IBEX – Lo observations of energetic neutral hydrogen atoms originating from the lunar surface [J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 60(1): 297 – 303.
- [22] Yoshifumi F, Stas B, Mats H, et al. Low energy neutral atoms imaging of the Moon [J]. *Planetary and Space Science*, 2006, 54(2): 132 – 143.
- [23] Hsieh K C, Zurbuchen T H, Orr J, et al. A collimator design for monitoring heliospheric energetic neutral atoms at 1 AU [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(1): 213 – 218.
- [24] Czechowski A. Anomalous cosmic rays as a source of energetic neutral atoms in the heliosphere [J]. *Advances in Space Research*, 2001, 27(3): 493 – 502.
- [25] Czechowski A, Hsieh K C, Hilchenbach M, et al. Anomalous helium ions as the source of energetic helium atoms in the outer heliosphere [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(1): 104 – 108.
- [26] Chase C J, Roelof E C. Computer simulations of energetic neutral atom imaging from low and high altitude spacecraft [J]. *Advances in Space Research*, 1997, 20(3): 355 – 359.
- [27] Scheer J A, Wieser M, Wurz P, et al. Conversion surfaces for action pressure on deposition and properties of boron – doped freestanding diamond films [J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(6): 1764 – 1768.
- [42] Pernegger H. High Mobility Diamonds and Particle Detectors [J]. *Physica Status Solidi (A) Applied Research*, 2006, 203(13): 3299 – 3314.
- [43] Ratnikova A K, Dukhnovsky M P, Fedorov Y Y, et al. Homoepitaxial single crystal diamond grown on natural diamond seeds (type IIa) with boron – implanted layer demonstrating the highest mobility of 1150 cm<sup>2</sup> /V at 300 K for ion – implanted diamond [J]. *Diamond & Related Materials*, 2011, 20(8): 1243 – 1245.
- neutral particle imaging detectors [J]. *Advances in Space Research*, 2006, 38(4): 664 – 671.
- [28] Pilkerton B M, Collier M R, Moore T E. Correlations between neutral and ionized solar wind [J]. *Advances in Space Research*, 35(2005), 35(12): 2152 – 2156.
- [29] Mura A, Orsini S, Milillo A, et al. Dayside H<sup>+</sup> circulation at Mercury and neutral particle emission [J]. *ICARUS*, 2005, 175(2): 305 – 319.
- [30] Fujii S, Michishita Y, Miyamae N, et al. Development of low energy neutral atom scattering spectroscopy based on CA-ICISS operable in gas phase atmosphere [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2005, 232(1 – 4): 290 – 294.
- [31] Barabash S, Lundin R, Zarnowiecki T, et al. Diagnostic of energetic neutral particles at MARS by the ASPERA – C instrument for the MARS 96 mission [J]. *Advances in Space Research*, 1995, 16(4): 81 – 86.
- [32] Czechowski A, Grzedzielski S. Distribution of ACR ions in the heliosheath and the related ENA flux [J]. *Advances in Space Research*, 1997, 19(6): 949 – 952.
- [33] McComas D J, Allegrini F, Balonardo J, et al. The two wide – angle imaging neutral atom spectrometers (TWINS) NASA mission of opportunity [J]. *Space Science Review*, 2009, 142(1 – 4): 157 – 231.