

# 神奇的宇宙射线<sup>\*</sup>

阮建红 (华东师范大学物理与电子科学学院 上海 200241)

**摘 要** 宇宙空间穿行着各类高能粒子,它们的起源、加速及传播机制是物理学家一直在探讨的基本问题。本文简要介绍宇宙射线的发现,目前的研究进展,以及国际国内主要的宇宙射线探测项目,重点介绍我国的暗物质粒子探测卫星及高海拔宇宙射线观测站取得的成果,并对未来的空间探测进行展望。

**关键词** 宇宙射线 银河系 粒子探测器

**文章编号** 1002-0748(2022)5-0002

**中图分类号** G633·7

**文献标识码** B

## 1 什么是宇宙射线

宇宙射线是在宇宙空间穿行的各类高能粒子。科学家通过实验发现,在我们地球上空大气层上,每秒钟每平方米大约受到 1 000 个粒子轰击,这些粒子中,约 90% 是质子,9% 是氦核,其他还包括更重的原子核、电子、正电子、反质子和光子等。

宇宙射线的发现首先要归功于奥地利物理学家赫斯(V. F. Hess),他因宇宙射线的发现获得 1936 年的诺贝尔物理学奖。早在 1785 年,法国物理学家库伦就发现,放在空气中的带电体会逐渐失去电荷,至于为什么会出现这种现象,一直无法解释。直到 19 世纪末 20 世纪初,随着天然放射性的发现,科学家们开始关注大气导电性的研究。实验发现,大气中存在来历不明的离子。最初,人们认为这种离子来自地面上的天然放射性物质,为了避免地面放射性物质的影响,人们把实验放到高空去做。1910 年,法国科学家沃尔夫(Theodor Wulf)制作了一台灵敏的静电计,在著名的巴黎埃菲尔铁塔(距地面 300 多米)上做实验,发现仍无法排除大气导电现象。1911 年,赫斯在前人工作的基础上,设计了更精密的仪器,为了完全排除地面放射性的影响,乘气球到达 1 千多米的高空,他发现带电体的漏电率与地面仍基本相同。1912 年,他多次进行了气球飞行实验,最高达到 5 千多米,实验结果表明,在高空 1 500 m 以下带电体漏电率与地面基本相同,但随着高度增加,辐射却明显增强。这一发现突破了人们的

认知,它表明在地球之外存在着某种高能量的辐射,它能贯穿大气层到达地面,从而使带电体漏电。这种辐射被称为“宇宙射线”,即来自地球之外的辐射<sup>[1]</sup>。

宇宙射线的发现,开启了人们研究基本粒子物理的大门。在第一台高能加速器建造之前,第一批基本粒子就是在探索宇宙射线的过程中发现的。比如,1932 年美国科学家安德森(C. D. Anderson)利用加磁场的云室研究宇宙射线的径迹时,发现了狄拉克(P. A. M. Dirac)所预言的第一个反粒子——正电子。1937 年,安德森等人在云室中发现了  $\mu$  子。1947 年英国科学家罗彻斯特(G. D. Rochester)和巴特勒(C. C. Butler)又在云室中发现了 K 介子。同年,鲍威尔(C. F. Powell)等人利用核乳胶技术在宇宙射线中发现了日本科学家汤川秀树(Hideki Yukawa)预言的  $\pi$  介子等。

## 2 宇宙射线的起源

宇宙射线来自哪里? 至今人们未有确切的答案。大致认为,能量低于几个 GeV( $10^9$  eV)量级的宇宙射线主要来自太阳或被太阳调制,它们与太阳上的剧烈活动相关,呈现出快速变化的特征。绝大部分的宇宙射线来自太阳系之外、银河系之内,它们表现出与太阳活动反相关的特性,当太阳风很强时,宇宙射线会被有效地阻止进入太阳邻域。通常,能量高于 PeV( $10^{15}$  eV)的宇宙射线称为超高能宇宙射线,高于 EeV( $10^{18}$  eV)的称为极高能宇宙线,一般认为极高能宇宙射线可能来自河外星系,它们在

<sup>\*</sup> 基金项目:本文是 2021 年上海高校市级重点课程建设项目“电磁学”的研究成果。

典型星际磁场中的回旋半径比银河系的尺度还大<sup>[2]</sup>。

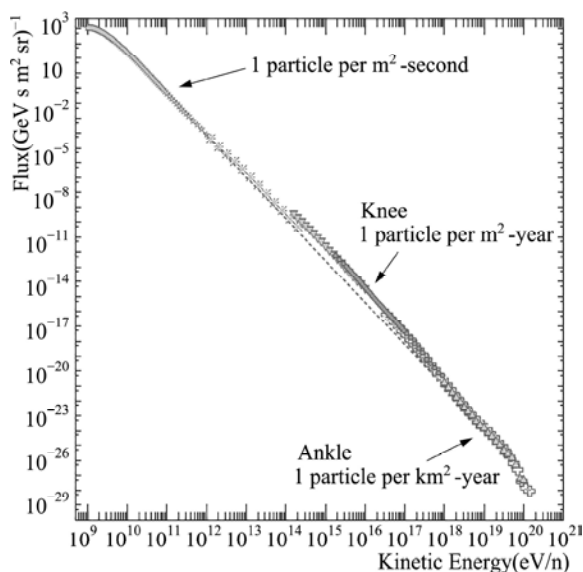


图 1 宇宙射线能谱<sup>[3]</sup>

根据实验的观测,宇宙射线的能谱从能量  $10^7$  eV 一直延伸到  $10^{21}$  eV,从整体上看,它们遵循着幂律谱形式:

$$\frac{dN}{dE} \sim E^\alpha \quad (1)$$

谱指数  $\alpha$  近似为  $-3$ ,如图 1 中虚线所示。细致地看,在  $3 \times 10^{15}$  eV 附近,存在着一个拐折,谱指数  $\alpha$  从  $-2.7$  变为  $-3.0$ ,此处称为“膝”,在  $5 \times 10^{18}$  eV 附近, $\alpha$  从  $-3.2$  变为  $-2.7$ ,此处称为“踝”。对于“膝”和“踝”的成因有很多解释,如成分的改变,起源的不同等。不少研究认为,“踝”是河外质子宇宙射线与宇宙微波背景光子相互作用产生正负电子对所致。

在地面上,目前实验室加速粒子能达到的最高能量为  $10^{13}$  eV 量级,是由欧洲核子研究中心的大型强子对撞机实现的,而宇宙射线的能量可以远远超过这个量级。什么样的机制能把粒子加速到如此高的能量呢? 科学家认为,高能宇宙线粒子一定是来自剧烈的天体活动过程。一般认为,超新星遗迹是银河系内宇宙射线的主要加速源,整个银河系中每百年大约有 3 次超新星爆发,每一次爆发都会给银河系注入巨大的能量,部分能量用来加速宇宙线。在超新星遗迹中,存在高速的激波,带电粒子在激波中的加速过程被认为是一种有效的加速机制。但最近也有研究认为,超新星遗迹很难把宇宙线加速到

超高能。对于极高能的宇宙射线,一般认为是来自脉冲星、脉冲双星或黑洞及活动星系核的喷流。

人们对宇宙射线的研究虽然已有 100 多年,但其起源、加速机制和传播过程等仍然是宇宙射线物理研究的基本问题。

### 3 国际上主要的高能宇宙射线探测器

人们对宇宙射线的探测主要可以分为两类,一类是在大气层上空通过气球或空间飞船上的探测器直接测量,目前可以测量从低能端到约  $10^{14}$  eV 的粒子;另一类是在地面建造大型探测器对高能端粒子进行间接测量。高能端的粒子流强较低,但在通过大气层时由于级联簇射产生大量的次级粒子。地面建造的大型探测器通常称为大气簇射阵列。

#### 3.1 宇宙射线的空间探测

目前,在大气层上空的直接粒子探测器中,最著名的当属由华人科学家丁肇中领导的国际合作项目——阿尔法磁谱仪(Alpha Magnetic Spectrometer, AMS02)。AMS02 于 2011 年 5 月由美国“奋进”号航天飞机送入太空,安装在国际空间站上,迄今已取得不少重要成果。AMS02 发现了正电子比例上升以及宇宙射线质子、氦核等核素在 TeV( $10^{12}$  eV)能区显著偏离单一幂律谱的特征等<sup>[4]</sup>,这些成果蕴含着关于宇宙射线产生、加速及传播的重要信息,不少学者试图从中寻找暗物质存在的证据。然而,AMS02 由于其磁场强度的限制,它的宇宙射线能谱无法测量到高于约 5 TV(磁刚度)。

另一个宇宙射线粒子探测器——量能器电子望远镜(Calorimetric Electron Telescope, CALET),由美、日、欧科学家研制,于 2015 年发射,与 AMS02 一样,安装在国际空间站上。CALET 不能区分正反粒子,它已发表电子(包括电子和正电子)和质子的宇宙射线观测结果,由于它在高于几个 TeV 有较差的电荷分辨率,其质子能谱目前大约只达到约 10 TeV<sup>[5]</sup>。

此外,高空探测器还有美国的费米伽马射线望远镜(Fermi Large Area Telescope, Fermi-LAT)等。2008 年 Fermi-LAT 发射升空,主要的科学目标是探测宇宙射线中的伽马射线成分,受限于探测器的设计,其带电宇宙射线粒子的测量误差较大。

受限于火箭的运载能力和高昂造价,卫星探测器面积一般非常有限,很难覆盖足够高的能区。高空气球实验兼顾了地面实验和卫星实验的优点,宇宙射线能量和质量实验(Cosmic Ray Energetics

And Mass, CREAM)是由美国马里兰大学领导的实验项目,与 AMS02 相比,CREAM 的接受面积更大,覆盖的能量上限比 AMS02 高数十倍。CREAM 测量到了从 TeV 到约 100 TeV 能区的粒子,发现质子与氦核在 TeV 能区有变软的迹象,但其统计误差较大,能谱变软的结论并不确定<sup>[6]</sup>。

### 3.2 宇宙射线的地面探测

宇宙射线的地面探测一般规模比较宏大,它主要是通过探测高能宇宙射线通过大气层时与大气原子核碰撞产生的次级粒子,通过对次级粒子性质的分析去回溯原初入射粒子的能量、方向及质量等信息。目前最具代表性的地面实验是位于阿根廷的 Pierre Auger Observatory 实验项目,它是以研究广延大气簇射的先驱——法国科学家 Pierre Auger 的名字命名的。Auger 观测站海拔高度约为 1 500 m,探测器的覆盖面积达到约 3 000 km<sup>2</sup>,主要用来探测能量高于 10<sup>18</sup> eV 的极高能宇宙线粒子。

与 Auger 实验类似的还有“高海拔水切伦科夫伽马天文台”(High Altitude Water Cherenkov Observatory, HAWC),这是由美国主导的实验,位于墨西哥海拔约 4 100 m 的高山上,主要能段覆盖区域为 100 GeV~100 TeV。此外,建在非洲纳米比亚海拔约 1 500 m 山上的 High Energy Stereoscopic System (HESS)是大气切伦科夫实验,主要探测能量约 0.03~100 TeV 范围内的伽马射线。与 HESS 同类型的还有 Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System (VERITAS)等。

## 4 我国在宇宙射线探测方面取得的成就

我国科学家在宇宙射线研究领域起步较晚,早期主要是参与一些国际合作项目,国家前期的经费投入也较为有限。近十多年来,这一状况得到极大的改善,国家在宇宙射线探测大科学装置建设方面投入了大量经费,我国科学家正运行自己主导的或正建设自己的探测器,并已初步取得了令人瞩目的成就。这里介绍我国的暗物质粒子探测卫星和高海拔宇宙射线观测站。

### 4.1 暗物质粒子探测卫星

暗物质粒子探测卫星(Dark Matter Particle Explorer, DAMPE, 俗名“悟空”),是由我国中科院紫金山天文台领导的国际合作项目,2015 年 12 月 17 日在酒泉发射成功,运行高度约为 500 km,至今已平稳运行了约 6 年时间,获得了大量的科学数据。DAMPE 能够探测正负电子、质子及重的核素

以及伽马光子。

“暗物质”和“暗能量”被普遍认为是 21 世纪物理学面临的新的“两朵乌云”,对其本质的认识将是打开新物理世界大门的钥匙。“悟空”卫星通过探测高能宇宙射线粒子的能谱来间接寻找暗物质粒子,即寻找暗物质粒子湮灭或衰变后留下的信号<sup>[7]</sup>。

迄今为止,DAMPE 观测到了正负电子能谱的几个特征<sup>[8]</sup>:(1)在约 50 GeV 处的变硬行为,这一结果此前已由 Fermi 实验发现;(2)能谱在约 0.9 TeV 处的拐折行为,这个特征首次由 DAMPE 实验以高置信度观测到,显著性达到 6.6 倍标准偏差,明确了 HESS 观测到的正负电子能谱拐折的迹象;(3)DAMPE 数据还初步显示出在 1.4 TeV 处可能存在能谱的精细结构,这是其他实验没有发现的,希望将来能通过更多更精确的数据加以确证(见图 2)。DAMPE 的观测结果为理解 TeV 能区电子宇宙射线的来源提供了重要数据,同时也对部分暗物质模型给出了重要的限制。

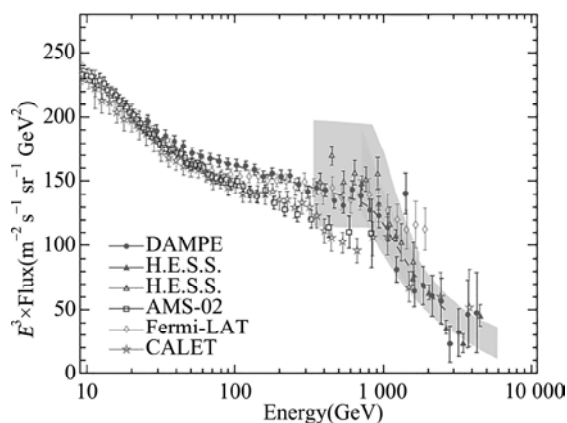


图 2 DAMPE 观测的电子能谱和其他实验结果比较<sup>[7]</sup>

DAMPE 还测量了质子宇宙射线的能谱并揭示出两个重要特征,一是在约 500 GeV 处的变硬结构,二是在约 14 TeV 处的变软结构。其中,14 TeV 处的变软结构首次由 DAMPE 实验以高置信度清楚地揭示出来。这些复杂的能谱结构表明,人们对宇宙射线起源和加速的常规理论需要做出修正。DAMPE 对氦核的能谱也给出了高置信度的结构特征。

随着 DAMPE 卫星的持续在轨运行和观测数据的进一步积累,我们期待 DAMPE 取得更多的原创性成果,促进人类对宇宙射线的起源和加速机制,以及暗物质的本质的认识。

### 4.2 高海拔宇宙射线观测站

高海拔宇宙射线观测站(The Large High

Altitude Air Shower Observatory, LHAASO) 是我国十三五规划建设的重大科技基础设施项目,坐落于海拔 4 410 m 的四川稻城海子山,于 2017 年开始建设。LHAASO 主要探测超高能段的伽马光子,它采用边建设边观测的模式,目前,科学家通过对已建成的 1/2 阵列探测器的观测数据进行分析,已取得重要的科学成果<sup>[9]</sup>。

科学家普遍认为,“膝区”以下的宇宙线起源于银河系,即银河系中存在超高能宇宙线加速源。对于带电的宇宙线粒子,由于其在星际磁场中会发生偏转,因而无法根据它们的方向去追溯源的位置。一个最直接而有效的方法是寻找加速源附近宇宙线粒子与星际气体相互作用产生的超高能伽马射线辐射,通过光子去追溯源的位置,LHAASO 就是这一研究的理想工具,其在超高能伽马射线能段具有世界领先的灵敏度。

2021 年 5 月,LHAASO 实验组在《Nature》上发表了他们重要的观测结果<sup>[10]</sup>:

(1) 发现了来自天鹅座内恒星形成区附近和蟹状星云超过 1 PeV 的超高能伽马光子,最高能量超过 1.4 PeV。

(2) 发现 12 个不同类型的稳定超高能伽马辐射源,有效伽马事例高于背景事例 7 个标准偏差,源位置测量精度 $\leq 0.30$ 。其中最亮的三个辐射源伽马能谱延伸到数百 TeV,且没有明显截断迹象。

此次 LHAASO 的重大发现在探寻宇宙射线起源的研究进程中具有里程碑意义。首先它是在宇宙射线研究历史上首次观测到能量超过 PeV 的伽马辐射,开启了 PeV 超高能伽马天文学的大门,为进一步探索极端宇宙打开了一个崭新的窗口;其次是,LHAASO 观测到的 12 个不同类型超高能伽马源,其辐射能谱均延续到几百 TeV 能量范围,表明产生这些伽马射线的母粒子的能量超过 1 PeV,打破了旧的宇宙射线加速模型极限,同时也表明,宇宙中普遍存在 PeV 宇宙射线加速源,向进一步揭示宇宙射线起源之谜迈出了至关重要的一步。

LHAASO 完全建成后,将成为伽马射线高能端探测灵敏度最高、TeV 能段巡天扫描搜索能力最强、覆盖宇宙射线能谱范围最广的超高能伽马射线探测装置,将长期引领 PeV 能段的粒子天体物理的研究。结合其他地空探索设施,LHAASO 有望在破解宇宙射线起源之谜、探索暗物质本质等国际基础研究前沿领域作出重要的贡献<sup>[9]</sup>。同时,我国的另一个国家重大科技基础设施 500 米口径球面射电

望远镜(FAST)<sup>[11]</sup>,具有世界领先的脉冲星搜寻能力,也能与 LHAASO 形成很好的协作。

## 5 小结与展望

在过去的近十年中,由于 AMS02、DAMPE、CALET、LHAASO 等新的宇宙线实验的开展,宇宙射线研究领域取得了重大进展,开启了一个精确研究宇宙射线的新时代。然而,新的观测数据也带来了新问题,即原有的关于宇宙射线起源、加速和传播的理论需要进行修正,当然这就意味着需要更多更精确的数据,即更大更精密的仪器。

一些新的空间探测计划即将实施或正在设计审批当中。目前最令人期待的应该是我国的高能宇宙辐射探测设施(High Energy Cosmic Radiation Detection Facility, HERD)<sup>[12]</sup>,HERD 计划将于 2025 左右安装于我国的空间站上。HERD 有两个主要的科学目标:(1)通过对 100 MeV~10 TeV 能区电子以及伽马射线的能谱观测,寻找暗物质粒子;(2)对 10 GeV~1 PeV 能区原初宇宙射线各成分能谱作直接精细测量。相比于已有的空间探测实验,HERD 在能量分辨率、能量上限、探测精度和有效接受度等主要技术指标方面将有明显的、甚至量级的提升,我们期待 HERD 能带来更多的重大科学发现。

## 参考文献

- [1] C Grupen. Astroparticle Physics [M]. Springer-Verlag Berlin Herd epberg, 2005.
- [2] T. K. Gaisser, et al. Cosmic Rays and Particle Physics [M]. Cambridge University Press, 2016.
- [3] M. Boezio, et al. Cosmic ray detection in space [J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2020, 112:103765.
- [4] M. Aguilar, et al. The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station [J]. Physics Reports, 2021, 894:1-116.
- [5] O. Adriani, et al. Extended Measurement of the Cosmic-Ray Electron and Positron Spectrum from 11 GeV to 4.8 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station [J]. Phys. Rev. Lett., 2018, 120:261102.
- [6] Y. S. Yoon, et al., Proton and Helium Spectra from the CREAM-III Flight [J]. Astro phys. J., 2017, 839:5.
- [7] 袁强,常进.暗物质粒子探测卫星研究进展[J].科学通报,2021,66(11):1299-1306.
- [8] DAMPE Collab. (G. Ambrosi et al.) Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons[J]. Nature, 2017, 552:63.
- [9] 杨睿智. LAASO 与宇宙线起源[J].中国科学,2022,52(2):229501.

(下转第 22 页)

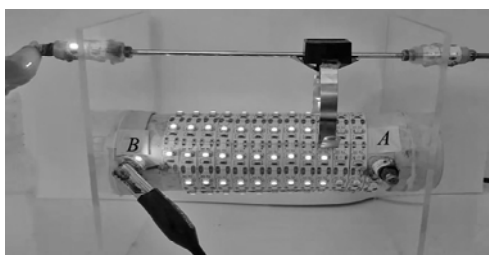


图 4 滑动变阻器模型

类似地,选择 B 和右上、A 和左上接线柱,移动滑片让学生根据 LED 发光情况通过体会、思考,构建电流路径。

选择金属杆两端(即“两上”)的接线柱,左右移动滑片,金属杆两端 LED 强烈发光且亮度不变;线圈中 LED 始终不发光。表明电流经金属棒,没有流经滑片和电阻丝,是无效的接法。

选择 A、B(即“两下”),左右移动滑片,接线柱 A、B 和所有的 LED 均微弱的发光,调节滑片亮度不变。表明此时电流流经整根电阻丝,电路中的电阻最大且不变。

### 3.2 模型的特点

与滑动变阻器相比,该模型的结构、外观高度相似,采用低压电源,电池盒可粘贴在线圈一侧的亚克力板下部,实现电源、模型一体化,便于移动,操作方便、安全。LED 发光亮度高,当滑片移动时,亮度变化明显,即使白天也看得非常清楚。该模型的创新之处在于发光接线柱的设计与制作,电流从哪个接线柱流入或流出时,该接线柱会发光,为学生完整地建构电流路径提供了感性素材,有助于学生深入理解滑动变阻器的工作原理。

### 3.3 注意事项

采用直流电源时,注意看清灯带与接线柱相连的 LED 的极性,不可接反。

## 4 反思与展望

4.1 充分认识自制教具的意义和价值,为学生的探究性学习做好表率

作为“坛坛罐罐当仪器,拼拼凑凑做实验”实验教学理念的倡导者、已故物理教育家朱正元教授历来主张物理教学应当“加强实验教学,必需就物论

理”,应当“就地取材,师生动手自制教具,让学生在熟悉的环境中探究实验、把握新知”。在新课程深入实施现今时代,自制教具仍是补充实验课程资源的重要途径。教学中,我们经常会发现常规实验器材存在着难以完成、可见度小、实验现象不明显或误差较大的缺陷,师生对这些问题进行深入的思考,进而通过自制教具替代常规器材或弥补其缺陷,这个过程本身就是科学探究的过程。自制教具活动有助于提高教师解决教学实际问题的能力,促进教师的专业化发展。取材于生活的自制教具,更容易使学生产生共鸣,激发学生探究新知识的欲望。

将自制教具的活动融入到课堂教学中,能真正实现“做中学”,促进物理深度学习的发生。例如,给学生提供焊接完毕的 LED 灯带和其他部件,要求学生根据教材中滑动变阻器的结构自主建构滑动变阻器模型,然后向同伴展示选用不同接线柱时电流的路径。这一教学活动,不但能加深学生对滑动变阻器结构、工作原理的理解,还能使学生体验到科技制作活动的艰辛与成功的喜悦。

4.2 应用新技术、新材料、新工艺,增强教具的实验效果与时代气息

低压 LED 灯带的出现,省去了串联限流电阻的环节,简化了模型的制作过程,直观性不变的同时,还可以采用低压直流电源供电,确保了实验操作的安全。智能操控的 LED 灯带具有多种动态显示效果,如果能制造出用“流水效果”模拟电流在线圈中流动的情景,则给学生带来的视觉效果会更加震撼。当今社会,新技术、新材料层出不穷,“利用现代科学技术、信息技术和新材料、新工艺,改造传统教学实验和仪器应成为今后自制教具的一个新的方向”,同时能引导学生关心社会生活和科学技术的发展,激发学生的创造灵感和创新精神,促进学生核心素养的提升。

### 参考文献

- [1] 高静. 用变色指甲油制作变色滑动变阻器[J]. 物理实验, 2018, 38(01): 64.
- [2] 吴敏. 巧用变色油墨 助力学生观察[J]. 物理之友, 2021, 37(06): 35—37.
- [3] 杨庚明, 李京. 利用红外热像仪探究滑动变阻器[J]. 中学物理, 2020, 38(20): 21—23.
- [10] Cao Z, et al. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectrovolts from 12  $\gamma$ -ray Galactic sources [J]. Nature, 2021: 1—4.
- [11] Nan R, et al. The five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) project [J]. Int J Mod Phys D, 2011, 20: 989—1024.
- [12] S N Zhang et al. Introduction to the High Energy cosmic-Radiation Detection (HERD) Facility onboard China's Future Space Station [J]. Proc. Sci. 2018, 2017: 1077.

(上接第 5 页)