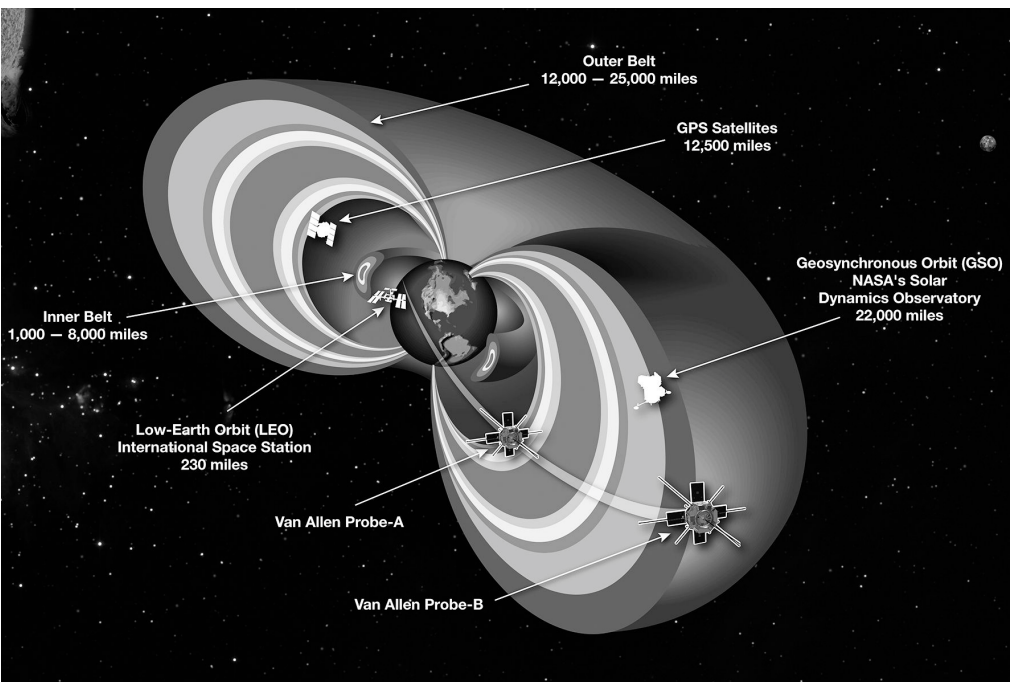


望远镜

地球辐射带的“破壁人”

■本报见习记者 池涵



两颗范·艾伦探测器卫星飞经辐射带剖面图。该图同时也展示了数层辐射带及其附近的其他卫星。
图片来源：NASA

地球辐射带是地球周围被地磁场捕获的高能带电粒子聚集区。一方面，它保护了地球免受太阳风吹来的带电粒子伤害，另一方面，地球辐射带也会对进入其领域的航天器所携带的电子器材和宇航员造成潜在威胁，其对环境、气候的影响也引起了科学家和各国政府的广泛注意。

人们已经陆续获得了辐射带的多层结构、大致范围以及带电粒子的能量等信息。然而，这些粒子是怎样加速的？它们的分布又是怎样变化的？这些问题尚未得到确切而圆满的回答。

目前，对于地球辐射带特征的解释主要依靠数值模拟来完成。4月15日，美国得克萨斯大学达拉斯分校物理学系博士后郑璉恒所在的研究团队在《地球物理研究期刊》(Journal of Geophysical Research)上发表文章，使用马尔可夫链方法首次实现了在电子与强电磁离子回旋波非线性相互作用下对辐射带演化的模拟。

地球外的两道“铜墙铁壁”

1957年，苏联发射的人类第一、二颗人造卫星斯普特尼克1号和2号相继上天，当苏联人沉浸在任务成功的喜悦中时，由于没有及时获取并分析辐射数据，他们不知道这两颗卫星正穿越一个未知的死亡地带，他们也因此与一个伟大发现失之交臂。

1958年，美国的第一颗人造卫星探险者1号(Explorer 1)成功入轨，通过分析卫星携带的辐射探测器数据，美国艾奥瓦大学的物理学家詹姆斯·范·艾伦发现了环绕地球的辐射带。因此地球辐射带又常被称作范·艾伦带，范·艾伦也因此荣登翌年《时代》杂志的封面。

在此后数十年的研究中，科学家们发现，地球辐射带分为内辐射带和外辐射带。美国西弗吉尼亚大学物理与天文学系助理教授徐蔚超向《中国科学报》介绍，内辐射带的高度在1千到6万公里，那里存在高能质子和电子。质子的能在10~100 MeV，电子能量稍低一些，在10~100 keV量级。更高能量的MeV能级的电子存在于1.3万~6万公里高度的外辐射带。

驶入“险滩”的卫星

那么，辐射带电子这么高的能量意味着什么呢？郑璉恒告诉记者，动能为1 MeV的电子的速度高达光速的94%，如此高能级的粒子具有极强的穿透性，可轻易穿透航天器的外壳抵达其电子元件内部，造成虚假的逻辑信号，或沉积在介电材料上并最终导致放电击穿电路。

由此造成的卫星失常包括：1994年的国际卫星组织K星(Intelsat K)、加拿大通信卫星Anik E-1、Anik E-2，以及1997年的Telstar 401星。这些都是地球同步轨道通信卫星。另外，辐射带粒子还会造成航天器太阳能电池板的加速老化。

除了对航天器，辐射带粒子对穿过其中的宇航员的健康也构成严重威胁，因此各国载人航天器大都航行在约300公里高的近地轨道上，且轨道倾角适中，以避开辐射带粒子沉积剧烈的地球两极。

然而，登月或者未来登上火星的任务轨道则无法避免穿越辐射带。如何保护宇航员和航天器安全地通过这些暗

流涌动的“险滩”成为了航天工程师们一个不得不解决的课题。

面对辐射带对航天器的威胁，比较可行的防护手段有如下几个。

首先，比较直观的想法可能是加强卫星的防护。随着卫星功能的越来越强、越来越多样化，对卫星有限体积内的载荷器件数量的要求越来越高，每一个载荷的防护都不可能做得特别厚。卫星发射的巨大成本也使得卫星的设计者在设计防护时不得不斤斤计较。更严重的是，防护也不是越厚越好。太厚的防护会使高能电子在其减速的过程中诱发出更多的次级电子以造成伤害。

其次，任务轨道的设计要尽量规避辐射带。但是对通信卫星和气象卫星非常重要的地球同步轨道，以及越来越重要的导航卫星的中圆地球轨道，则恰好位于外辐射带中。这些卫星，设计寿命中一共会受到多大的辐射剂量，可能会遭遇到多大程度的辐射带粒子爆发，这些信息对卫星的设计者而言都是有指导意义的。卫星的设计者一方面可以用过去的任务中积累的实测数据来估计，另一方面则依赖对辐射带的模拟给出答案。“这是辐射带模拟一方面的动机。”郑璉恒说。

另一方面，作为一门科学，地球辐射带中粒子是怎样被加速到如此高能量的(太阳风吹来的电子能量仅有几keV)，高能电子数量的巨大涨落又是怎么造成的，影响辐射带形态的因素有哪些，这些问题都需要通过辐射带的模拟来得到解答。

从非线性到非线性

那么，科学家们是怎样做辐射带模拟的呢？

郑璉恒告诉《中国科学报》，空间物理学家根据带电粒子在地磁场中的运动特征提出了三个绝热不变量，这为描述辐射带粒子的运动带来了极大的方便。

辐射带中的等离子体波对带电粒子的共振散射会导致某个或某几个绝热不变量的变化。科学家用非线性扩散来描述这种微小而随机的共振散射，并通过福克-普朗克方程来研究所有基于准线性扩散理论的辐射带模型。

郑璉恒说，过去20年来，辐射带福克-普朗克模拟得到了非常丰硕的结果，辐射带中加速与漏逸过程的主要结论几乎都是通过福克-普朗克模拟得到或证实的。

不过，科学家的数值模拟工作也通过新的实际观测结果，处在不断改进的过程中。

2012年8月，两部探测地球辐射带的范·艾伦探测器由NASA发射升空。随后，越来越多的观测表明辐射带中的等离子体波并不总是微弱的或者杂乱无章的，这些波对辐射带粒子的散射也不是微弱的或者完全随机的。这显然违背了准线性扩散理论的基础假设。这时波与粒子的相互作用进入了非线性领域。

于是，非线性波粒子相互作用成为了近来辐射带研究的热点。

美国波士顿大学天文学系助理教授李雯向《中国科学报》介绍，对单个测试粒子的模拟表明，非线性波粒子相互作用对辐射带粒子的散射可以是方向性的，有一部分电子被等离子体波困住，从而可以跟波发生长期作用。这种特殊的波粒相互作用有可能会对导致对电子的效率高于准线性相互作用。然而对于辐射带中的大量粒子，非线性相互作用是如何影响其演化的则一直没有定论。

例如，电磁离子回旋波经常强到足以激发非线性散射，可以在几秒钟内把

高能电子的投掷角改变数十度；而在准线性理论中同样的改变则要耗时数分钟。这不禁使人猜想在非线性相互作用下电磁离子回旋波能够更快地清空辐射带。由于不满足准线性理论的条件，现有的福克-普朗克模型无法用来解答这个问题，因此需要一种全新的方法来模拟辐射带。

新的数值模拟模型诞生

数学上，一般的随机过程可以用马尔可夫链来描述，而福克-普朗克方程则是这种描述在微弱条件下的近似。郑璉恒团队使用马尔可夫方法首次实现了在强电磁离子回旋波与电子非线性相互作用下对辐射带演化的模拟，这也是第一个正面回答了非线性相互作用如何影响辐射带演化的工作。

通过与福克-普朗克模型的结果比较，郑璉恒发现，非线性相互作用并不会更快地清空辐射带。但是，它却造成了高能电子在漏逸锥附近出现准线性理论无法预言的分布形态。

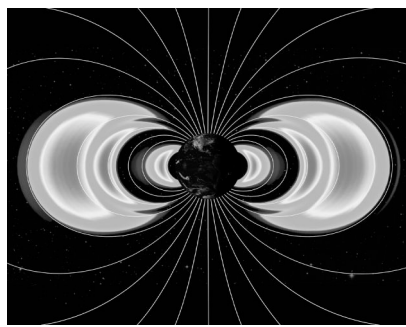
地磁场好似一个巨大的磁箍，带电粒子受其约束在两个端点之间做往复运动。当带电粒子速度方向与磁力线方向的夹角(投掷角)足够小时，粒子会从端点处逃出。这个临界投掷角围绕磁力线构成的锥面就叫做漏逸锥。

准线性理论中，漏逸锥附近的电子速度方向越接近磁力线方向数量越少，而非线性相互作用下这种趋势会被反转。当用低轨道卫星观测时，这表现为沿磁力线的高能电子束流。然而现有的低轨道卫星携带的粒子探测器的角度分辨率尚不足以分辨漏逸锥内的分布状况，因此这个理论预测还有待未来的观测加以验证。

郑璉恒告诉《中国科学报》，当今对于辐射带的探测主要来源于美国和欧洲的卫星。我国国内的辐射带研究现阶段主要使用这些探测器的公开数据，或与国外合作进行，在理论研究方面已经取得了比较突出的成绩。

随着近年来中国国力的强盛，越来越多的资源正被投入到空间科学的研究中，越来越多的中国科学卫星发射上天，比如“悟空”“张衡”“墨子”等等。郑璉恒憧憬，在这些卫星提供的数据帮助下，地球辐射带的模型能够日趋完善，引导着人类的航天事业破除“坚壁”，走向深空。

相关论文信息：
DOI: 10.1029/2018JA026156



该图由两颗范·艾伦探测器所携带的相对论性电子——质子望远镜数据所绘制，它显示了一层新观测到的辐射带。
图片来源：APL/NASA

视界

现代航天之父齐奥尔科夫斯基曾说过：“地球是人类的摇篮，但人类不可能永远被束缚在摇篮里。”人类对太空的好奇与探索自古有之，从中国远古时候的女娲补天、嫦娥奔月，到明朝的万户自制制的火箭飞天，从冷战时期美苏太空争霸，到今天航天领域成为主要航天大国竞相角逐的战略高地。新的航天时代已经到来，航天的竞争也更加激烈。

目前，全球共有12个国家具备航天发射能力，70多个国家拥有自己的卫星，有1400多颗卫星在轨道上正常运行，250多名宇航员曾在太空生活工作，人类已经把探索的触角延伸到了太阳系各大行星。

世界航天发展态势

整体上看，世界航天发展呈现四个突出特点：

战略上顶层牵引、高度重视。遵循战略优先，如美国历届政府均将“确保美国在太空领域领导地位和全球领先地位”作为国家战略的核心之一；遵循统一领导，建立总统或总理最高决策、统一领导的管理体制；遵循规划引领，制定未来20年乃至30年的总体规划，分步实施，避免一事一议；遵循法律保障，已有29个国家颁布了航天法，建立了较为完善的法律法规体系。

技术上快速提升、创新驱动。快速提升进入空间、利用和控制空间能力。美国、俄罗斯均开始研制近地轨道运载能力达到100吨以上的新一代重型运载火箭。卫星由传统单星向“一星多用、多星组网、多网协同”的体系化、智能化转变，并呈现出微小化卫星和高性能卫星两极发展趋势。高度重视前瞻性、颠覆式创新。更加注重强健航天工业基础，美国把航天在国的国防工业基础作为“新三位一体”战略(由核力量和规范力量构成的进攻性打击系统、主动和被动防御系统以及能够迅速应对多种威胁的后备反应基础设施组成)的重要组成部分，持续加大对研制、生产、试验、测试等基础设施建设的投入，着力构建自主可控、灵活健康、竞争力强的工业基础。

模式上多元发展、国家主导。政府投入稳定增长，近年来，美国航天局和国防部对航天投入每年均超过40亿美元。注重军民融合，国际上已形成军用、民用、商业航天协调发展的格局，民、商用卫星平战结合，平时为经济社会发展服务，战时则为军事斗争需要服务。市场力量积极参与，例如，美国SpaceX公司着力研发低成本、可重复使用运载火箭，成为撬动美国“廉价”航天的杠杆。航天技术溢出转化效益显著，美国航天局有3万多项技术成功转化，其中60%产生明显经济效益，15%进入到产业化进程。据统计，美国航天投入产出比高达1:14。

国际间竞争激烈、合作密切。空间战略资源竞争激烈。未来10年，全球卫星发射数量预计将超过2000颗，SpaceX和OneWeb等商业公司还分别提出了多达上千颗卫星的组网计划，空间轨道、位置、无线电频率等已成为战略性资源，争夺日趋激烈。空间安全形势日趋严峻。太空军事应用已成为现实，空间碎片数量大幅增长，国际空间站为躲避空间碎片撞击每年要变轨10多次。国际规则主导权争夺不断加剧。传统航天大国和新兴国家激烈争夺新的国际规则主导权。国际合作不断深入，航天多边、双边合作日趋活跃。

中国航天重大工程

中国航天自1956年10月8日国防部第五研究院诞生之日起，在党中央的英明决策、坚强领导下，在以钱学森为代表的科技泰斗的接续奋斗下，创造了以“两弹一星”、载人航天、月球探测为里程碑的辉煌成就，走出了一条自力更生、自主创新的发展道路，我国已昂首屹立于世界航天大国之列。

步入新时代，在以习近平新时代中国特色社会主义思想的指导下，中国一系列航天重大工程顺利推进。“长征”“神舟”“嫦娥”“天宫”频频闪耀在公众视野，中国航天一次次的跨越，也不断标志着中国太空探索的新高度，火箭运载能力进入国际先进水平，空间技术、空间应用取得丰硕成果。

载人航天工程第二步胜利完成，中国航天迈进了“空间站时代”，载人航天工程第三步空间站工程已全面展开，各主要系统均在按计划进行初样研制。探月工程实现了“绕”“落”“回”三步走战略中“落”这个第二阶段，“嫦娥四号”飞行任务的成功，实现了人类探测器首次月背软着陆、首次月球背面新篇章。北斗三号卫星导航系统按计划完成基本系统组网部署，并开始提供全球服务，使我国成为继美、俄之后世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家。高分辨率对地观测系统目



薛惠锋

纵横博览新时代的航空航天

薛惠锋

创新发展，全面贯彻落实国家创新驱动发展战略，把提高自主创新能力作为事业发展的战略基点，更加注重原始创新和颠覆性技术创新；坚持协调发展，统筹推进科学部署各类航天活动，推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展。

力争到2020年左右实现重点突破，加速迈向航天强国；2030年左右实现整体跃升，跻身航天强国之列；2050年之前实现超越引领，全面建成航天强国。

面向未来，中国航天探索宇宙的脚步不会停歇，将持续积累培育发展新技术动能。

从单项突破到群体创新

当前，各学科交叉融合加快、新兴学科不断涌现，重大创新更多地出现在学科交叉领域，加快产业技术体系整体演进和生产生活方式深刻变革。随着先进材料、先进制造、微电子等技术与航天科技日益融合，航天领域新概念、新技术大量涌现，迎来新一轮创新发展与升级换代高潮。科技发展呈现出群体突破的态势，信息技术、生命科学、纳米技术、先进制造技术、新材料、新能源等构成的高新技术群体，与航天科技彼此渗透交叉、构成了协同发展的复杂体系；随着数理科学、信息科学、材料科学、生命科学等领域出现的重大进展，一些重要的科学问题和关键技术发生革命性突破的先兆已经显现，这将是多个学科的“群体突破”，航天科技将进入一个前所未有的创新群体集聚时代。新一轮科技革命引发的航天科技发展的认知、信息、电子、通信、材料、制造、能源/动力等基础技术领域的“群体突破”，必将为中国航天科技的革命性突破孕育出重大机会。

从依赖地面到轻量智能

随着人工智能技术的发展和推广应用，航天器将能够自主完成制导、导航和控制，数据处理、故障判断和部分重构与维护工作，从而大大减少对于地面测控、通信等支持系统的依赖。同时，集成电路和人工智能技术的发展，可为航天系统小型化、轻量化、智能化、低功耗以及自主可控的需求提供解决方案。除此以外，在大数据的支持下快速发展的认知计算，将极大地提高机器人分析和决策能力；灵活的机器人末端执行器将大大提高机器人的应用范围。人机协作机器人是智能机器人在工业领域迈出的第一步，将帮助人摆脱简单重复性劳动，替代人独立完成精巧复杂的操作。

从简单重复到模块通用

借助前沿技术和先进制造，带来了制造理念和制造模式的转变，充分利用信息化等技术和手段，进行航天制造业流程的优化和整合，可以有效提高型号产品的研发效率、降低研发成本、缩短研制周期、提升产品质量，不断满足进度需求，航天制造进入体系化、模块化、通用化发展新阶段，对航天装备的研制、生产、使用、维护和保障具有多重意义，全面支撑航天装备制造转型和发展。

从信息封闭到天地一体

信息时代，信息系统的互联互通、信息的顺畅传输与智能分布式处理成为必需，这进一步推动了天基的航天器系统与地面的其他信息系统全面实现互联互通，并高度交互和融合。在对地观测卫星领域，时空信息获取的天地一体化与全球化，时空信息处理加工的自动化、智能化与实时化，时空信息管理和分发的网格化，时空信息服务的大众化等需求，时刻推动着对地观测卫星系统与其他观测系统的设计一体化、部署一体化和应用一体化。

从近地为主到走向深空

随着2024年国际空间站的退役，届时中国作为全球唯一拥有空间站的太空国家，将会加速空间资源的研究和开发。从以往重重力研究、生命科学和航天医学逐渐转向技术验证、空间科学等领域，促进空间和地面水的创新技术和应用发展。

未来，空间探测将持续保持热度，探测目标重点集中在月球、火星和小天体，兼顾太阳系其他天体，任务类型更加复杂，并向载人探测方向发展。月球探测以月球资源、能源和特殊环境利用以及通过月球向更远深空为目标，未来将重点探测月球表面、极地以及水资源和各类矿藏，从而为月球基地的建设做准备。火星探测将重点探测生命信号以及宜居性，为载人火星探测做准备和奠定技术基础。小天体探测将关注科学、资源利用以及地球防护方向，同时作为空间探测技术能力发展和储备的重要试验场，重点研究其保留的太阳系原始物质，同时开展小行星撞击预警和防护研究。

(作者系国际宇航科学院院士、中国航天系统科学与工程研究院院长)