

NASA 的银河宇宙射线模拟器 - 在地球上研究太空辐射的影响

Lisa Simonsen^{1*} 和 Tony Slaba²

¹NASA 总部 (美国, 华盛顿特区)

²NASA 兰利研究中心 (美国, 弗吉尼亚州, 汉普顿)

少年审稿人

CLARA,
MADELEINE,
AND
ORLAITH

年龄: 11 - 12

JIARUI

年龄: 15

银河宇宙射线 (Galactic cosmic rays)

高能粒子, 包括质子和重离子, 在太空中以接近光速的速度移动。

伽马辐射 (Gamma radiation)

一种高能电磁辐射形式, 波长较短, 由原子核的放射性衰变产生。

地球的大气层和天然磁场有效地屏蔽了太空辐射对我们的影响。太空辐射不同于地球上的辐射, 地球上的辐射主要来自岩石和土壤中的物质, 或像 X 光检查之类的医疗程序。太空辐射来自太阳释放的粒子或太阳系外恒星爆炸 (超新星) 产生的粒子。这些粒子在太空中加速到接近光速, 电子被剥离。NASA 面临的巨大挑战之一是保护宇航员免受这些高能粒子 (银河宇宙射线, Galactic cosmic rays, 简称 GCRs) 的影响, 因为它们会导致癌症和其他疾病。为了理解 GCRs 造成的生物损伤并制定保护宇航员的方法, NASA 在地球上建造了银河宇宙射线模拟器。

什么是银河宇宙辐射?

银河宇宙射线 (GCRs) 是人类进行长时间太空旅行时所面临的主要的辐射危害。GCRs 来自我们的太阳系之外, 可能是由超新星形成的——恒星在其生命尽头时发生的大爆炸。地球上的辐射源通常包括伽马辐射和 X 射线 (和医生或牙医用的一样), 而 GCRs 由元素周期表中从氢到铀的各种元素的原子核组成。当一个原子的所有电子都被剥离时, 它们被称为完全电离粒子。GCRs 移动得非常快——一些粒子的速度接近光速。太空辐射被称为混合场辐射, 这意味着它包含各种粒子, 且它们都以不同

全电离粒子 (Fully ionized particles)

被剥离所有电子的原子。

图 1

银河宇宙射线包含重离子, 这些离子可以穿过人体细胞并造成 DNA 损伤 (紫色), 相比地球上的辐射, 如 X 射线或伽马辐射, 这种损伤更难被人体修复 (图片由 NASA 提供)。

的速度运动。这些高能粒子来自太空中的各个方向, 与地球上发现的辐射类型相比, 它们对生物体的破坏性更大 (如图 1 所示)。了解这种差异对于评估我们的宇航员所面临的健康风险至关重要 [1]。

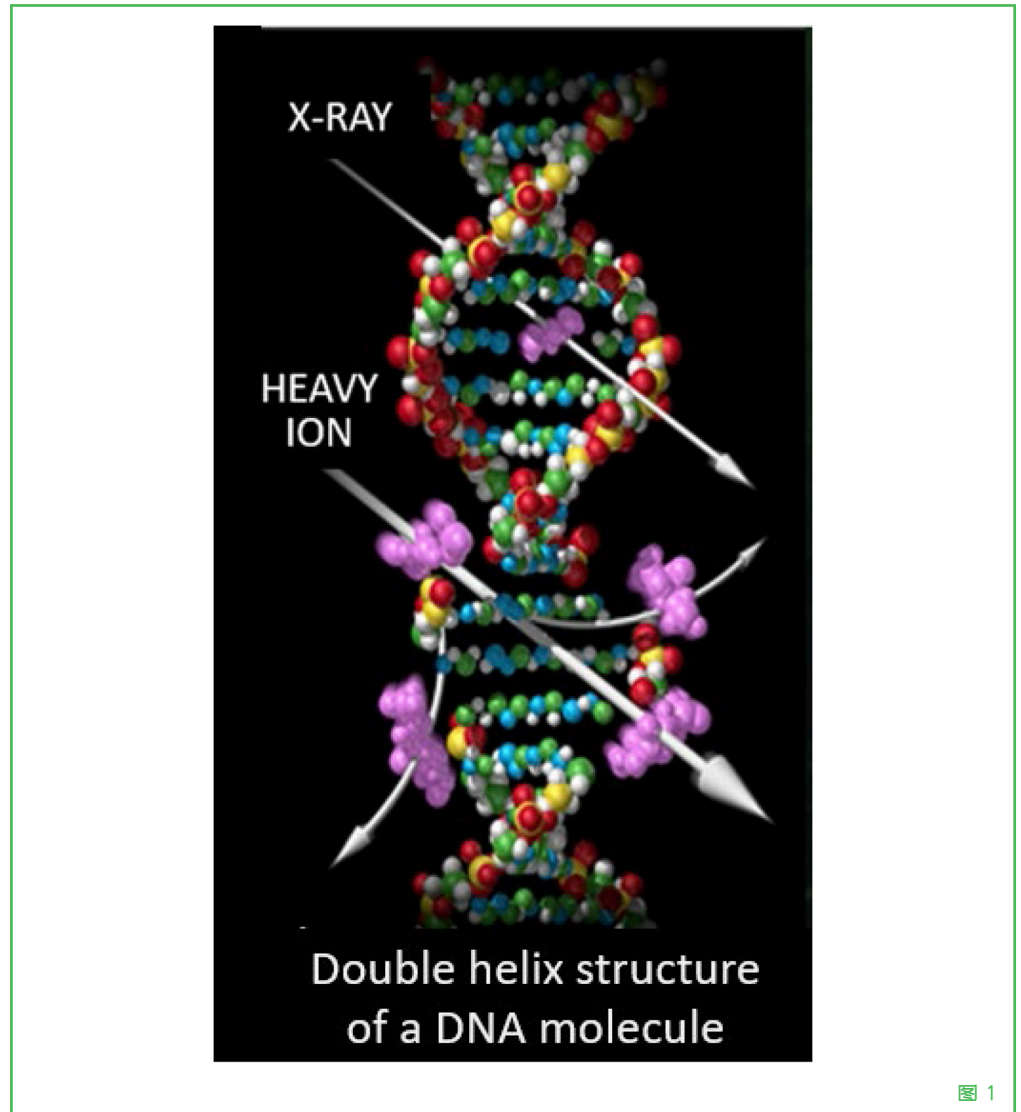


图 1

重离子 (Heavy ions)

带电数大于 3 的元素核, 如氧、碳或铁, 由于它们的某些或所有 (全电离) 行星电子已被剥离而呈正电荷。

氢约占银河宇宙射线 (GCRs) 粒子的 87%, 氦约占 12%, 所有比氦重的粒子 (称为**重离子**) 占剩下的 1% [2]。虽然重离子的数量远少于氢和氦, 但它们对生物体的破坏性非常大, 估算它们带来的健康风险非常困难。GCRs 中的每个粒子都有广泛的能量范围。对于低能量的 GCRs, 几厘米的生物组织或航天器屏蔽层就能完全阻挡这些粒子。对于高能量的 GCRs, 即使是几米厚的屏蔽也无法完全阻挡这些粒子——这些粒子的速度接近光速! 科学家们意图测试所有能量范围内辐射的损伤效应。

次级辐射 (Secondary radiation)

由主要太空辐射与屏蔽物相互作用产生的辐射, 包括中子。

让研究更加复杂的是, GCRs 在与航天器屏蔽层和人体组织相互作用时会发生变化。相互作用会减缓 GCR 粒子的速度, 并产生新的粒子, 这些新的粒子被称为**次级辐射**。次级辐射包括诸如中子等原子粒子, 它们可以进一步穿透生物体并造成比原始 GCR 更大的损伤。因此, 航天器内

部的宇航员面临的辐射环境是两种辐射的混合：穿过屏蔽层的初级 GCR 粒子和 GCR 粒子与物质相互作用产生的次级辐射。

宇航员的辐射暴露量有多少？

宇航员每天接触到的银河宇宙射线（GCRs）不仅取决于他们航天器提供的屏蔽程度，还取决于他们任务的时长以及在太阳系中的位置。如果靠近地球，例如国际空间站（ISS）上的宇航员受到了地球保护性磁场的明显保护。而对于前往月球和火星的任务，最大的辐射暴露发生在更远的太空中。一旦登陆月球或行星表面，月球或行星的质量将保护宇航员免受一半的 GCRs。在火星上，大气层还提供了额外的保护。除了航天器提供的屏蔽外，人体组织本身对关键器官也提供了一定程度的保护。

为了估算宇航员的辐射暴露量，NASA 使用一系列工具和测量方法来计算达到敏感器官（如肺部、心脏和大脑）的辐射量。下一步可以根据接收的辐射剂量和类型估算生物损伤的程度。生物损伤通常使用单位希沃特(Sv) 来描述。宇航员的辐射暴露范围从短期航天飞机任务约 20 毫西弗 (mSv, 即 10^{-3}Sv)，到在 ISS 上长期逗留超过 300 mSv。进行为期 30 天的月球任务的宇航员将接受约 40 mSv 的辐射暴露，而进行将近 3 年的火星任务的辐射暴露则约为 1,200 mSv。与地球上平均年度暴露量小于 3 mSv 的工作人员相比，宇航员接受到的辐射是所有现代辐射从业者中最高的。

对于执行长期太空任务的宇航员，辐射健康风险是什么？

宇航员在执行太空任务期间以及任务完成后的很长时间内都面临来自银河宇宙射线（GCRs）的辐射风险。诸如火星任务这样的高辐射暴露任务期间，主要的风险是大脑可能发生的变化，会导致飞行过程中表现较差。太空飞行后，宇航员面临更多的疾病风险，包括血液癌（如白血病）、实体癌（如肺部或消化系统肿瘤）、与心脏相关的疾病，以及晚年可能恶化的与大脑相关的疾病（有关宇航员面临的健康风险的更多细节，请参阅《Frontiers for Young Minds》文章）。NASA 正在努力加深对飞行期间及长期健康风险的理解，以便更好地保护宇航员免受这些风险的影响。

如何在地球上模拟太空辐射？

了解宇航员面临的辐射威胁的方法之一是在地球上进行研究。但是，正如我们之前提到的，地球上的辐射与太空中的辐射是不同的。因此，首先，我们必须找到在地球上重现太空辐射的方法。我们需要大型粒子加速器装置来加速粒子到足够高的能量，以模拟太空环境。然而，这些设施一次只能产生一种类型的粒子——正如我们提到的，太空辐射是一

希沃特 (Sv) (Sievert (SV))

辐射生物损伤的衡量单位，反映给定剂量辐射的生物学影响。

粒子加速器 (Particle accelerator)

一种利用电磁场将带电粒子加速到非常高速度和能量的机器。

个包含了周期表中几乎所有元素的混合辐射场！这导致在地球上模拟太空辐射非常困难。

2003 年, NASA 开始使用布鲁克海文国家实验室的 NASA 太空辐射实验室 (NSRL) 进行其地面重离子研究 (图 2)。在这里以及世界各地, 大多数暴露于太空辐射的健康风险研究都是使用单一能量的单一粒子。在过去的十年中, 对 NSRL 进行的不断升级使它更加接近太空辐射暴露。今天, 该设施可以在单个辐射实验中每 2-4 分钟切换一种粒子类型, 提供多种类型和能量的粒子 [3]。虽然粒子能量仍远低于航天器外的 GCR 场, 但 NSRL 能够模拟宇航员在航天器内遇到的各种类型和能量的 GCR 粒子, 这些粒子在穿过航天器的屏蔽层时已显著减速。

图 2

(A) 纽约长岛的卫星图像, 布鲁克海文国家实验室所在地。(B) 航拍照片显示产生高能离子所需的大型加速器设施。顶部的“RHIC”环的周长为 2.4 英里, 以示比例。NSRL 使用一个“助推器”环, 其周长约为 286 英尺, 并且内部布满了强力磁铁以加速离子。(C) NSRL 的目标室内部, 进行实验的地方 (图片由 BNL 提供)。

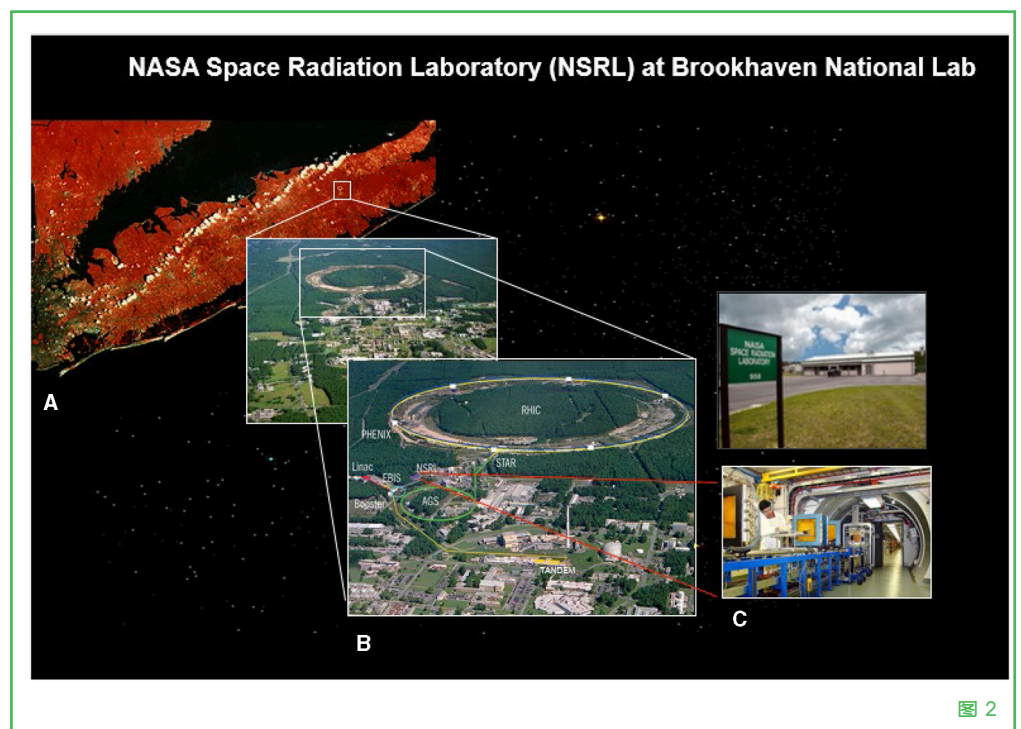


图 2

NSRL 是唯一能够近似模拟太空辐射的设施。NSRL 的系统和控制软件经过优化, 能够可靠迅速地提供粒子束 (图 3)。每次银河宇宙射线 (GCR) 模拟需要使用 21 个独特能量离子束的切换组合。典型的暴露需要约 75 分钟才能完成。为了更接近模拟太空中较低的剂量率, 可以在 2 至 6 周内每天进行几次较小的暴露。模拟太空中低剂量率的 GCR 仍然是 NASA 面临的巨大挑战之一。

NASA 如何使用这个模拟器？

NASA 正在利用银河宇宙射线 (GCR) 模拟器制定保护策略, 以减少对宇航员健康的影响, 并确保他们在未来的长期任务中保持最佳状态。尽管我们从国际空间站 (ISS) 的宇航员那里了解了很多, 但关于宇航员面临的辐射健康风险, 特别是在火星任务期间将经历的大剂量辐射暴露,

图 3

从固体和气体源中产生和加速离子的复杂的系统和设备。(A) 使用激光蒸发高纯度固体靶材以产生模拟所需的离子。靶材支架尺寸为 25 厘米乘以 6 厘米。铁靶材大致与美国 25 美分硬币大小相当。(B) 电子束离子源进一步剥离这些离子的电子, 然后将其送入加速器的“助推器环”, 加速离子束至高能量。(C) 为了产生最低能量的离子束, 通过在束线中插入聚乙烯片来减慢某些离子的速度 (图片由 BNL 提供)。

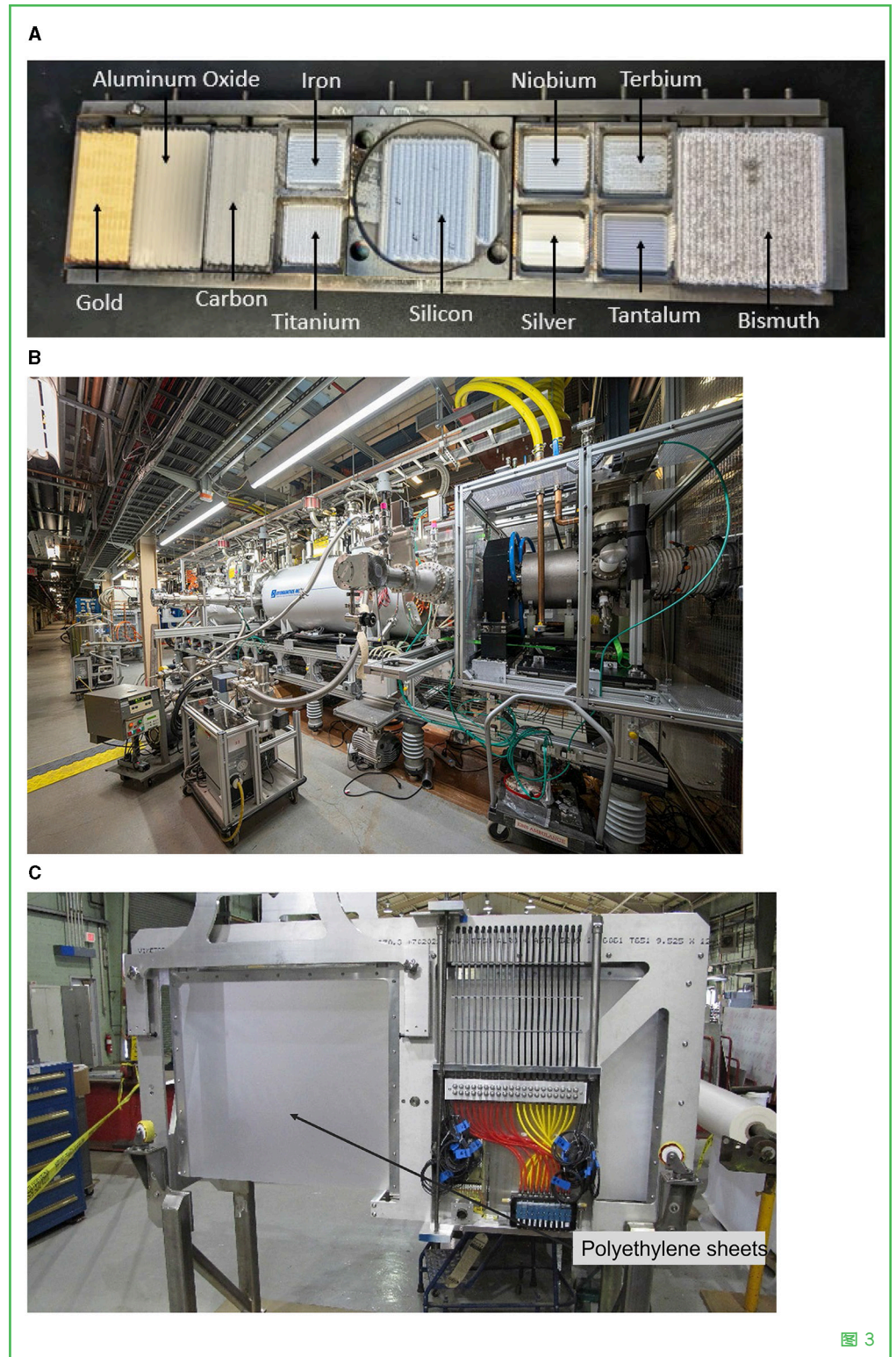


图 3

仍有许多细节未知。在可控条件下, GCR 模拟器使研究人员能够在地球上进行混合场辐射研究。研究团队正在利用细胞和实验动物系统, 以及先进的组织“芯片”技术, 研究混合场辐射的影响。NASA 将利用这些结果更好地估计辐射健康风险, 并在需要时更新辐射暴露限制。GCR 模拟器还可以让科学家测试保护宇航员的方法。多个研究团队目前正在测试各

抗氧化剂 (Antioxidants)

人造或天然物质, 可以防止或延缓自由基或不稳定分子引起的某些类型细胞损伤。

种药物和膳食补充剂 (如**抗氧化剂**和抗炎药物) 的有效性, 以减少对敏感组织的辐射损伤。

还有哪些主要的模拟挑战?

仍然有太空辐射的重要问题需要科学家们回答。关键挑战包括确定银河宇宙射线 (GCR) 模拟器是否足够精确地模拟太空中的辐射环境, 以准确预测对人类健康的影响。科学家们仍在学习如何正确进行这些测试, 并致力于更好地模拟深空辐射暴露, 包括确定哪些动物和细胞类型提供了关于人类如何应对太空辐射的最佳信息。预计研究结果将很快出现, 并将帮助 NASA 保护那些正在进行太空探索的勇士们。

致谢

感谢墨子沙龙公益科普平台对本文中文翻译的贡献。

原文

Simonsen, L. C., Slaba, T. C., Guida, P., and Rusek, A. 2020. NASA's first ground-based Galactic Cosmic Ray Simulator: enabling a new era in space radiobiology research. *PLoS Biol.* 18:e3000669. doi: 10.1371/journal.pbio.3000669

参考文献

1. Cucinotta, F. A., and Durante, M. 2006. Cancer risk from exposure to galactic cosmic rays: implications for space exploration by human beings. *Lancet Oncol.* 7:431–5. doi: 10.1016/S1470-2045(06)70695-7
2. Slaba, T. C., and Whitman, K. 2020. The Badhwar-O'Neill 2020 model. *Space Weather* 18:e2020SW002456. doi: 10.1029/2020SW002456
3. La Tessa, C., Sivertz, M., Chiang, I. H., Lowenstein, D., and Rusek, A. 2016. Overview of the NASA space radiation laboratory. *Life Sci. Space Res.* 11:18–23. doi: 10.1016/j.lssr.2016.10.002

线上发布: 2024 年 9 月 11 日

编辑: [Janice L. Huff](#)

科学导师: [Jian Zhang](#) 和 [Chris North](#)

引用: Simonsen L 和 Slaba T (2024) NASA 的银河宇宙射线模拟器 – 在地球上研究太空辐射的影响. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2024.1327936-zh

英文原文: Simonsen L and Slaba T (2024) NASA's Galactic Cosmic Ray Simulator - Studying the Effects of Space Radiation on Earth. *Front. Young Minds* 12:1327936. doi: 10.3389/frym.2024.1327936

利益冲突声明: 作者声明, 该研究是在没有任何可能被解释为潜在利益冲突的商业或财务关系的情况下进行的。

版权 © 2024 © 2024 Simonsen 和 Slaba. 这是一篇依据 [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#) 条款发布的开放获取文章。根据公认的学术惯例, 在注明原作者和版权所有, 及在标明本刊为原始出处的前提下, 允许使用、传播、复制至其他平台。如违反以上条款, 则不得使用、传播或复制文章内容。

少年审稿人



CLARA, MADELEINE, AND ORLAITH, 年龄: 11 - 12

我们都住在威尔士的加的夫, 喜欢做科学实验、读书和演奏乐器。我们最喜欢的系列书是《哈利波特》。我们分别会拉小提琴、吹法国号、弹钢琴、吹长笛、竖笛、小低音号、小号和短号! 我们最喜欢的课程是表演艺术、数学和音乐。



JIRUI, 年龄: 15

我叫嘉瑞, 是中国一所中学的九年级学生。我在全国英语演讲比赛中获奖, 并获得了编码的省级奖项。我喜欢弹钢琴, 已经以优异的成绩获得了 ABRSM 八级证书。我对物理学充满热情。我还喜欢烘焙和烹饪。我喜欢狗, 家里养了两只贵宾犬。

作者



LISA SIMONSEN

丽莎·西蒙森博士是美国华盛顿特区 NASA 总部的空间辐射系统集成高级科学家。她的工作是确认减少宇航员辐射暴露相关的研究和技术开发, 在最小化健康风险的同时推进 NASA 的任务目标。此外, 西蒙森博士为纽约厄普顿的 NASA 空间辐射研究实验室提供技术指导, 这是一个进行生物研究和电子测试的实验室。西蒙森博士于 1997 年在弗吉尼亚大学 (夏洛茨维尔, 弗吉尼亚州) 获得核工程和健康物理学博士学位。

*lisa.c.simonsen@nasa.gov



TONY SLABA

托尼·斯拉巴博士是位于弗吉尼亚州汉普顿的 NASA 兰利研究中心的物理研究员。他是 NASA 空间辐射传输代码的主要开发者, 该代码用于评估航天器的屏蔽效果和宇航员的保护措施。斯拉巴博士和同事们开发了在 NASA 地面加速器装置模拟太空辐射环境, 进行放射生物学实验的新技术。斯拉巴博士还致力于改进和更新 NASA 用于预测宇航员因空间辐射暴露而产生的终生癌症风险的模型。斯拉巴博士于 2007 年在奥多明尼大学获得计算与应用数学博士学位。



中文翻译由下列单位提供
Chinese version provided by